

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра приладобудування**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ М. Д. Гераїмчук  
(підпис) (ініціали, прізвище)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

**Козюкову Денису Сергійовичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації \_\_\_\_\_ " " " " " "

науковий керівник магістерської дисертації

**Безвесільна Олена Миколаївна, д.т.н., професор**

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 р. № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом дисертації 06 грудня 2019 р.

3. Перелік завдань, які потрібно розробити Вступ. Огляд літературних джерел за темою, вибір і обґрунтування напрямів та методів дослідження. Розробка математичної моделі ємнісного чутливого елемента. Визначення метрологічних характеристик. Моделювання роботи чутливого елемента в якості стабілізатора. Розробка методів дослідження чутливого елемента. Аналіз і узагальнення результатів досліджень.

4. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Схеми 1 арк. ф. А1. Вологомір. Складальний кресленник, 1 арк. ф. А1. Робочі креслення деталей, 2 арк. ф. А1. Графічні матеріали, 3 арк. ф. А1. Презентаційний плакат 1 арк. ф. А1.

5. Орієнтовний перелік публікацій 1 стаття у фаховому виданні

## 6. Консультант розділу дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розробка стартап-проекту</i>	<i>Бояринова К.О., д.е.н.,</i>		

7. Дата видачі завдання 30 жовтня 2019 р.

## Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів дисертації	Примітка
1	Огляд літератури за темою	30.10.19 – 10.11.19	
2	Розробка математичної моделі приладу визначення вологості природного газу	08.11.19 – 16.11.19	
3	Визначення метрологічних характеристик приладу	14.11.19 – 20.11.19	
4	Моделювання роботи приладу обліку визначення вологості природного газу	15.11.19 – 30.11.19	
5	Розробка програмного забезпечення	14.11.19 – 06.12.19	
6	Аналіз отриманих результатів	27.11.19 – 06.12.19	
7	Оформлення МД та її графічної частини	20.11.19 – 05.12.19	
8	Передача МД на перевірку науковому керівнику	06.12.19	
9	Передача матеріалів МД на перевірку виявлення збігів/схожості текстів	09.12.19	
10	Представити МД на рецензію	10.12.19	
11	Представити МД на затвердження зав. кафедри	11.12.19	
12	Передача електронної версії МД до бібліотеки	17.12.19	
13	Представити МД до екзаменаційної комісії НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»	18.12.19	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Д. С. Козюков  
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_  
(підпис)

О. М. Безвесільна  
(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

У магістерській дисертації надано опис ємнісного чутливого елемента. Показані його переваги та деякі недоліки. Надано опис основних типів стабілізації.

Наведені основні розрахунки ЧЕ; надано опис вібростолу і проведено дослідження характеристик ємнісного ЧЕ, представлене його складальне креслення. Представлено графічну частину: складальне креслення чутливого елемента, робочі креслення деталей ЧЕ; креслення основних експериментальних графіків досліджень ЧЕ; 3D модель; стартап.

## **РЕФЕРАТ**

The master's thesis describes the capacitive sensing element. Its advantages and some disadvantages are shown. The basic types of stabilization are described.

The basic calculations of SE are given; the description of the vibrating table is given and the characteristics of the capacitive ES are investigated, its assembly drawing is presented. The graphic part is presented: assembly drawing of the sensing element, working drawings of details of SE; drawings of the main experimental graphs of the CE studies; 3D model; startup.

## ЗМІСТ

Реферат .....	4
Перелік позначень та скорочень.....	7
Розділ I. Мікромеханічні датчики прискорення. Огляд та класифікація .....	8
1.2 Огляд сучасних конструкцій МЕМС акселерометрів.....	10
1.2.1. П'єзоелектричні акселерометри .....	10
1.2.2. П'єзорезистивні акселерометри .....	13
1.2.3. Ємнісні акселерометри.....	14
1.2.3.1. Сервоакселерометри.....	19
1.3. Технології виробництва ємнісних акселерометрів без використання кремнію .....	23
1.4. Види і особливості стабілізаторів .....	25
1.5. Принцип дії ЧЕ.....	30
1.6 Математична модель ЧЕ .....	32
Висновки до першого розділу .....	34
Розділ II. Експериментальні дослідження ємнісного мемс акселерометра.....	35
2.1. Опис експериментальної установки для досліджень МЕМС ДЄА.....	35
2.1.1. Вібростенд експериментальної установки.....	37
2.1.2. Досліджуваний ДЄА .....	47
2.1.3. Зчитувальний та оброблюваний пристрій.....	51
2.1.3.1. Мікросистема збирання даних .....	51
2.1.3.2. Мікроконтролер Arduino Uno R3.....	52

2.2. Візуалізація результатів досліджень МЕМС ДЄА .....	56
2.3. Градувальна характеристика ДЄА .....	58
2.4. Визначення базових параметрів роботи макету .....	61
2.5. Проведення експерименту.....	62
2.6. Результати досліджень МЕМС ДЄА.....	64
2.7. Визначення метрологічних характеристик МЕМС ДЄА.....	65
Висновки до другого розділу.....	71
Розділ II І. Розробка стартап - проекту.....	72
Висновки до розділу 3.....	86
Висновки.....	87
Список літератури.....	88
Додатки .....	90

## ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

$C$  – ємність чутливого елемента (ЧЕ);

$ЛБТ$  – легка броньована техніка;

$\varepsilon$  – діелектрична проникність;

$m$  – маса чутливого елемента;

$h$  – коефіцієнт затухання;

$k$  – коефіцієнт пружності

$S$  – площа пластин ЧЕ;

$\delta$  – поточний зазор між пластинами ЧЕ;

$\delta_0$  – початковий зазор між пластинами ЧЕ;

$\Delta$  – зміщення (переміщення рухомої пластини, ємності, діелектричної проникності);

$\psi$  – кут повороту середньої рухомої пластини ЧЕ;

$U_{вих}$  – вихідна напруга мостової схеми ЧЕ;

$U_0$  – напруга живлення;

$I_{1,2}$  – струми у ланках мосту включення ЧЕ;

$\omega_0$  – частота резонансного контуру резонансної схеми;

$\omega_r$  – частота генератора живлення резонансної схеми;

$R$  – активний опір;

$P$  – потужність;

$F$  – сила зворотного впливу;

$Q$  – електричний заряд

$k_1$  – пьезоелектрична стала

$W_e$  – енергія електростатичного поля;

EEPROM – постійний запам'ятовуючий пристрій датчика, що електрично стирається та пере програмується;

$V_{DD}$  – вхід напруги живлення;

$V_{SS}$  – заземлення;

## РАЗДІЛ 1. МІКРОМЕХАНІЧНІ ДАТЧИКИ ПРИСКОРЕННЯ. ОГЛЯД ТА КЛАСИФІКАЦІЯ

За побудовою, сучасні мікромеханічні (МЕМС) акселерометри умовно поділяють на такі ознаки [1, 2]:

1) за наявністю зворотного зв'язку:

а) акселерометр з прямою дією (пружинний) – це акселерометр, в якому передбачено конструкцією декілька або одне перетворення сигналу, який вимірюється, в одному напрямку через те що схема розімкнута, тобто зворотній зв'язок не застосовується;

б) акселерометр з компенсаційним типом – це акселерометр, в якому автоматичне урівноваження відбувається для інерційної сили яка знаходиться в чутливому елементі, який застосовує зворотній зв'язок. Якщо дивитися на зниження відносної похибки, то даний тип акселерометра звісно має серйозну перевагу в порівнянні з акселерометрами прямої дії.

Сила, завдяки якій відбувається автоматичне збалансування інерційних сил чутливого елемента акселерометра, зазвичай піддається виміру і також можна підлаштовувати для підвищення точності вимірювання. Варто також зауважити, що за рахунок того, що відбувається зменшення результуючої помилки, акселерометр знижує свою чутливість, через те що вона пропорційна коефіцієнту передачі акселерометру.

2) кількість вимірювальних осей:

а) однокомпонентний акселерометр - це акселерометр який має одну вимірювальну вісь;

б) двокомпонентний акселерометр – це акселерометр який має дві, взаємно перпендикулярні, вимірювальні вісі;



в) трикомпонентний акселерометр – це акселерометр який має три взаємно перпендикулярні вимірювальні вісі;

3) тип деформації механічного підвісу рис. 1.1:

- а) деформації вигину
- б) деформації кручення
- в) складних деформацій



Рис.1 Різновиди деформації підвісу а) Деформація вигину, б) Деформація крутіння, в) Комбінована деформація.

4) за видом вихідного сигналу:

- а) з безперервним у вигляді напруги або опору;
- б) з дискретним у вигляді цифрового або частотного сигналу.

За принципом переміщення інерційної маси:

а) осьові – це акселерометри у яких переміщенням чутливого елемента прямолінійне в системі координат, яка жорстко пов'язана з корпусом приладу.

б) маятникові – це акселерометри з кутовим і переміщенням чутливого і елемента в системі координат, яка жорстко пов'язана з корпусом прилада [2]

Види акселерометрів за способом знімання вихідного сигналу:

а) п'єзоелектричні;

б) п'єзорезистивні;

в) пьезопльоночні;

г) ємнісні;

д) струнні, магнітні (ефект Холла, Магніторезисторні і так далі) конвекційні (теплові акселерометри Memsic) та інші.

## **1.2 Огляд сучасних конструкцій МЕМС акселерометрів**

На даний момент найперспективніші МЕМС акселерометри для виробництва є п'єзоелектричні, п'єзорезистивні та ємнісні датчики вимірювання прискорення. [2]

### **1.2.1. П'єзоелектричні акселерометри**

Прямий п'єзоелектричний ефект дає нам можливість перетворити механічний вплив до кварцового кристалу або до пьезокерамічного елемента. Після того як зміститься кристалічна решітка на поверхні чутливого матеріалу з'являться пропорційний прикладеній силі електричний заряд.

Природний кристал кварцу це один з кращих матеріалів для п'єзоелектричних сенсорних елементів. Кварц має можливість роботи при температурі вище 300 ° С, однорідною чутливістю і в температурному діапазоні, високою міцністю, лінійністю ефектів, відсутністю гістерезису при впливах різного роду, високим вихідним опором порядку 10<sup>14</sup> Ом, він допускає роботу за частотах менше 1 Гц.

Кварцові п'єзоелектричні (ПЕ) елементи являють собою одинокі пластини або конфігурації, набрані з тонких пластин які з'єднані в стеки рис.2. На рис.3 приведена ілюстрація фізичних принципів п'єзоелектричних акселерометрів. [2]

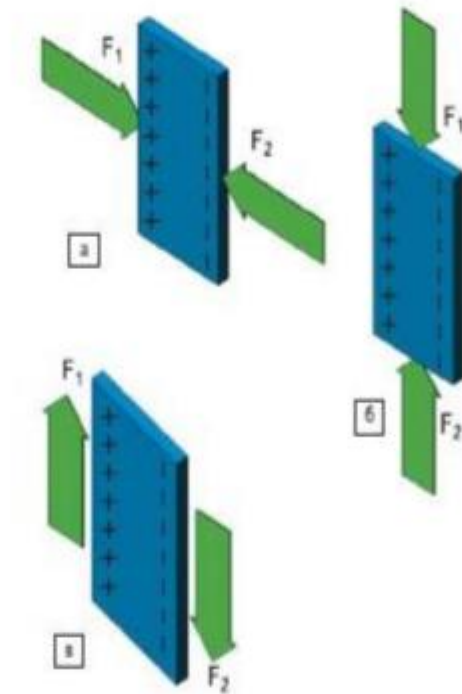


Рис. 2. Ілюстрації фізичних принципів п'єзоелектричних акселерометрів: а-в - ілюстрації залежності поляризації п'єзоелемента від напрямку діючої сили  $F$ : а - поздовжня поляризація;  $F_1$ ,  $F_2$  - поперечні впливають сили; б - поперечна поляризація;  $F_1$ ,  $F_2$  - вертикальні сили; в - поляризація при зсуві;  $F_1$ ,  $F_2$  - сили зсуву однієї поляризованість поверхні пьезоелемента щодо іншої; [2]

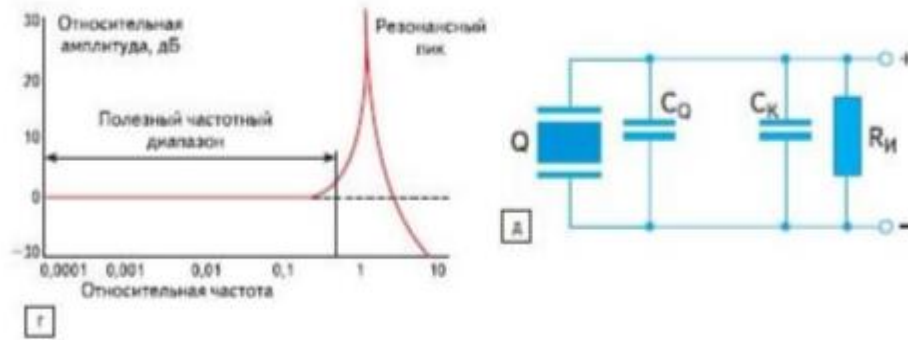


Рис. 3. Ілюстрації фізичних принципів п'єзоелектричних акселерометрів: г - типова робоча частотна характеристика п'єзоелектричного акселерометра (ілюстрація з [2]); д - еквівалентна схема п'єзоелектричного акселерометра з високим опором; [2]

Більшість ПЕ-акселерометрів це є пристрої нерезонансного типу, їх робоча частотна смуга для яких обмежується зверху резонансною частотою  $\omega$ , в моделі слабодемпфованої системи з одним ступенем свободи  $x$ , яка визначається з виразу:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

Як правило, чутливість і резонансна маю частотну залежність від маси акселерометра. Прикладом конструкції п'єзоелектричних акселерометрів приведено на рис.4

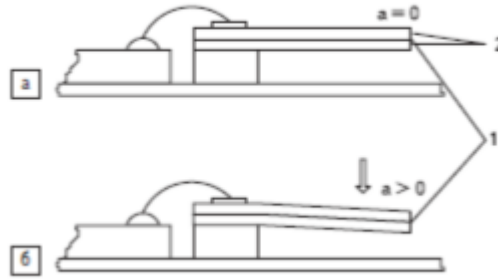


Рис. 4. Приклад п'єзоелектричних акселерометрів: а, б - принцип роботи біморфного п'єзоелектричного датчика, який працює на вигин (це є концепція Bosch для аварійних натяжних ременів і датчиків для визначення нерівності дороги [49]): а – це в стані спокою; б – це під дією прискорення: 1 - це пьезокерамический біморфний пружний елемент і, що працює на вигин («measuring beam»); 2 – це шари з антипаралельними тобто протилежним напрямком поляризації; а – це прискорення;

Переваги п'єзодатчиків це високий динамічний діапазон і однорідна чутливість, а також точності і такі вигідні фізичні та геометричні властивості, які мають можливість реалізації акселерометра з малою вагою і розмірами.

### 1.2.2. П'єзорезистивні акселерометри

Для точного вимірювання прискорення в п'єзорезистивних акселерометрах використовуються кремнієві резистори які згинаються вони також відомі, як вимірювачі механічної напруги. Конструкція подібних цим датчикам вимірювання прискорення є одна або декілька консольних балок на яких закріплена рухома маса. В наслідок вигину консолей відповідно опір кремнієвих резисторів змінюється і внаслідок зміни опору вимірювальних плечей цього моста Уїнстона за допомогою вимірювання напруги з'являється можливість детектувати цей вплив прискорення на чутливий елемент акселерометра. Тому завдяки особливостям конструкції п'єзорезистивного MEMC-датчики дозволяють

вимірювати статичну прискорення, яка дає змогу даному типу інтелектуальної системи перевагу перед ПЕ-акселерометрами. Через високі робочі характеристики, розробка нових датчиків прискорень даного типу не втрачає актуальності. [2]

На рис. 5 показана типова п'єзорезистивного MEMC - структура. Кремнієву пластину протрують так, щоб інерційна маса підтримувалася на консольних балках, які є собою дифузійними резисторами, чутливими до деформації.



Рис. 5. Типова п'єзорезистивного мікромеханічними структура:

Основними недоліками п'єзорезистивних акселерометрів є вузький температурний діапазон і підвищена уразливість перед механічними діями, що призводить до руйнування. [2]

### 1.2.3. Ємнісні акселерометри

Найбільшого поширення серед MEMC-акселерометрів отримали ємнісні датчики прискорення, які засновані на ємнісному перетворенні мікропереміщень інерційної маси.

У порівнянні з п'єзоелектричними датчиками, яким потрібні тільки спеціальні матеріали і динамічний вхід мінімальної частоти, ємнісні акселерометри можуть бути побудовані на кремнії і забезпечують здатність детектування DC-прискорення без ослаблення сигналу і значимого нульового зсуву (що важливо, наприклад, в системах інерціальної навігації). [3]

У порівнянні з недорогими мікромеханічними п'єзрезистивного акселерометрами, які можуть ефективно використовуватися в комбінації з недорогий бруківці обробної електронікою, причому саме в низькочастотних або статичних вимірах прискорення, ємнісні датчики пропонують низьку температурну чутливість. Температурний коефіцієнт опору допированного кремнію на два порядки вище, ніж температурний коефіцієнт ємності, незважаючи на зміни в геометрії ємнісного акселерометра внаслідок температурного розширення. [2]

Класична конструкція ємнісного MEMS -акселерометра є диференційний конденсатор. Він складається з двох жорстко зафіксованих електродів між якими знаходиться механічно пов'язаний з рухомою масою електрод - обкладання рис.6.

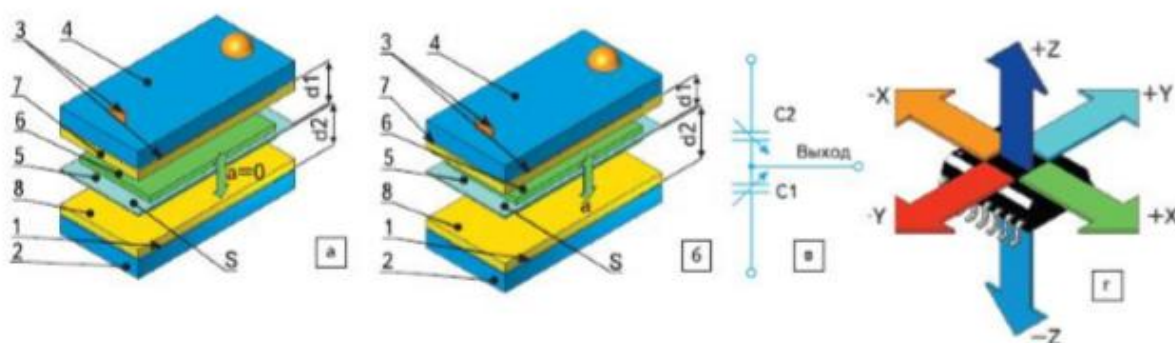


Рис. 6. Ілюстрація вимірювального принципу диференційного ємнісного акселерометра: а, б - фізична модель вимірювальної структури (корпус перетворювача умовно не показаний): 1, 3 - нерухомі металеві обкладки; 2,

4 - зафіксовані друковані плати; 5 - рухома обкладка; 6 - інерційна маса (метал або діелектрик); 7, 8 - шари діелектрика;  $S$  - фіксована площа перекриття обкладок;  $d_1$ ,  $d_2$  - змінні відстані між обкладинками;  $a$  - акселерометр в стані спокою;  $b$  - під дією прискорення  $a$ ;  $v$  - еквівалентна електрична схема;  $g$  - розміщення вимірювальних осей і ступенів свободи (піввісь) щодо корпусу ІС в корпусі SOIC [3]

Диференціальний режим з'єднання двох конденсаторів  $C_1$  і  $C_2$  (рис. 19в) дозволяє збільшити амплітуду і поліпшити лінійність сигналу, так як залежність ємності від переміщення є нелінійною. Більшість диференціальних ємнісних акселерометрів об'єднує електроніку, яка завершує міст Уїтстона (аналогічно п'єзореzystивного датчикам) і обробляє сигнал, використовуючи, наприклад, співвідношення  $C_1 / C_2$  або  $(C_1 - C_2) / (C_1 + C_2)$ . [2]

Чутливий елемент (ЧЕ) ємнісного акселерометра виконаний у вигляді маси, яка є рухомою обкладкою диференціального конденсатора і закріплена на пружному підвісі з жорсткістю  $k$ . Спрощена схема показана на рис. 7. При переміщенні незафіксованою обкладання диференціальні ємності будуть змінюватися. Наприклад, при зменшенні ємності  $C_1$ , ємність  $C_2$  буде збільшуватися.





Рис. 7. Спрощена конструкція диференціального конденсатора ємнісного акселерометра

Найбільш актуальною на даний момент конструкцією диференціального ємнісного MEMC-акселерометра є зустрічноштиревое розташування електродів (рис. 8). Як ємнісний структури був обраний варіант зі змінним зазором, що обумовлено високою чутливістю даного варіанту. [2]

З метою мінімізації нелінійності вихідної характеристики робочий діапазон даного приладу лежить в лінійній зоні при малих переміщеннях.

Підхід до вимірювання ємності полягає в вимірі імпедансу на змінному струмі, зазвичай при подачі на електроди збудливого сигналу джерела живлення у вигляді синусоїдальних або прямокутних імпульсів напруги. Вихідний сигнал ємнісного елемента є високоімпедансним (1-100 МОм), для зниження якого доцільно подавати харчування високої частоти (вище 50 до Гц). Високі частоти допомагають знизити рівень шумів.



Рис. 8. Конструкція диференціального ємнісного МЕМС – акселерометра

Обробка сигналу ємнісного чутливого елемента зазвичай проводиться в ланцюзі демодулятора. Додаткові елементи схеми здійснюють посилення і фільтрацію сигналу.

Датчики, порушувані безперервним хвильовим сигналом, використовують синхронні демодулятори, що забезпечують високу точність і мінімізують вплив робочих частот.

Диференціальні акселерометри використовують для харчування нерухомих обкладок рівні, але протифазні напруги частотою близько 1 МГц - при нульовому положенні рухомої обкладки вони дадуть нульове вихідний напруга на вході демодулятора. Такий метод харчування дозволяє досягти нелінійність менше 0.2%. [3]

Також для вимірювання ємності застосовується метод, який представляє собою перетворення відносини вимірюваної і опорної ємностей в електричний сигнал. Зазвичай цей метод дає нелінійність порядку 1%, але застосування підсилювача напруги дозволяє зменшити значення нелінійності залежності напруги до 0.5% [3]

Важливою особливістю і перевагою ємнісного способу детектування прискорення перед іншими типами є порівняльна простота конструювання. Розвиток напряму розробки інтегральних датчиків і систем дозволяє реалізувати різні конструкції, підвищувати ступінь інтеграції і знаходити шляхи вирішення складних технологічних завдань.

Ємнісні акселерометри дозволяють вимірювати прискорення в напрямку будь-якої з шести ступенів свободи за рахунок різних розташувань чутливого елемента. Робочий діапазон частот ємнісних сенсорів лежить в діапазоні від вимірювання статичного прискорення до сотень g. На даний момент застосування ємнісної техніки є основним напрямком в сфері вимірювання прискорення, і мають велику кількість варіантів реалізації. Розглянемо їх докладніше.

### **1.2.3.1. Сервоакселерометри**

Серед ємнісних акселерометрів широко поширені пристрої, що працюють в режимі замкнутого циклу, - force balanced (балансиремого силою) або servo (стежать) акселерометри [3], які використовують отриманий сигнал зміни в ємності в якості напруги зворотного зв'язку, протидії руху маси і утримання в центральне положення (примусова зворотний зв'язок).

Еквівалентна лінійна фізична модель, що ілюструє принцип роботи сервоакселерометра в напрямку одного ступеня свободи (піввісь), показана на рис. 9.

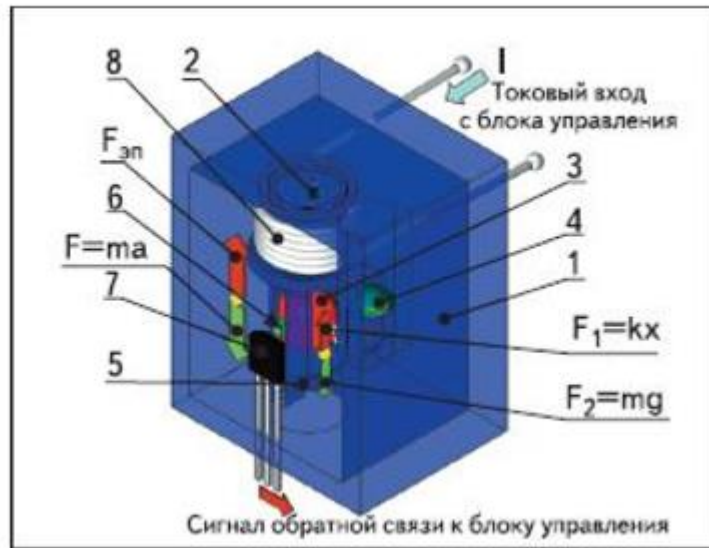


Рис. 9. Сервоакселерометр: а- напрямок прискорення, що діє на датчик; 1 корпус пристрою; 2 пружина; 3 інерційна маса (з феромагнітним матеріалом); 4 демпфер; 5 механічний обмежувач переміщень при перевантаженнях (виході за допустимі робочі межі прискорення  $a$ ); 6 постійний магніт, прикріплений до маси 3; 7- датчик Холла; 8- електромагніт;  $F_{эл}$ ,  $F$ ,  $F_1$ ,  $F_2$  - сили, що діють в моделі [3]

У стежать датчиках прискорення напруга зворотного зв'язку, отримане з виходу на зовнішній підсилювач повертається на конденсатор, що призводить до появи електростатичного сили між обкладинками, яка прагне утримати рухливу масу в первісному положенні.

В силу низьких показників лінійності сигналу, складності настройки і високої температурної чутливості був створений аналог пьезорезисторних методів вимірювання прискорення в ємнісному варіанті - ємнісні датчики, які

представляють собою герметичну МЕМС - структуру, що складається з мембрани, з'єднаної з двома нерухомими обкладинками. Рухома і нерухомі обкладки ізолюються одна від одної матеріалами з малим коефіцієнтом теплового розширення, щоб уникнути залипання або перевантаження. Корпусування тришарової кремнієвої структури дозволяє

використовувати різні способи демпфірування. На малюнку 10 показана фізична модель кремнієвого ємнісного акселерометра.

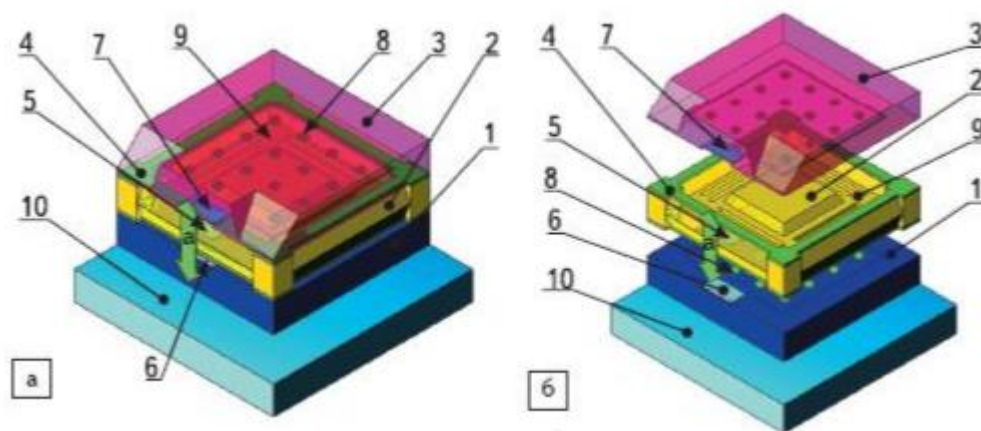
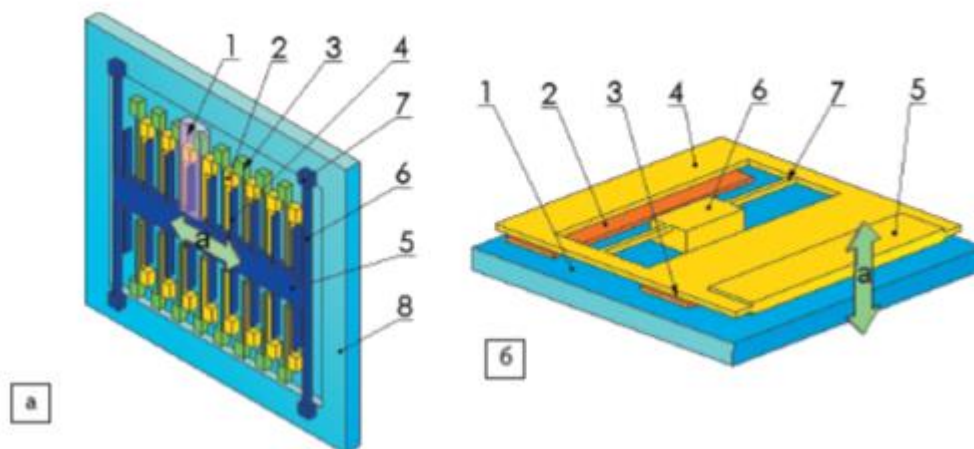


Рис. 10. Фізична модель кремнієвого ємнісного акселерометра: а - вид в збірці; б - модульний дизайн: а - напрямок дії прискорення; 1 - нижня кремнієва пластина - обкладка; 2 - інерційна маса (центрально кремнієва пластина); 3 - верхня кремнієва пластина - обкладка; 4 - оксид кремнію  $\text{SiO}_2$ ; 5, 6, 7 термінали; 8 - обмежувачі перевантажень (аррестори при значних ударних навантаженнях); 9 - пружинний підвіс інерційної маси; 10 - скляна підкладка

Технології, іменовані поверхневими, дозволяють значно зменшити габаритні розміри інтегрального датчика прискорення, знизити ціну на готовий виріб в силу економічної структури, а також детектувати прискорення в площині, паралельній поверхні кристала в високому діапазоні - від статичного до високих значень. Типовий чутливий елемент поверхневого кремнієвого

акселерометра - це полікремнева мікромеханічна структура, що представляє собою масу з пружинними підвісами, які утримують масу вище підкладки в горизонтальному положенні і забезпечують опір переміщенню під дією прискорення. Така структура, показана на рис. 11 в одновимірному виконанні, може бути перетворена в двовимірний або тривимірний варіант. На рис. 11б показаний ще один варіант - асиметрична місткість Z

структура, яка в повністю кремнієвому виконанні використовується компаніями Bosch, Ford, а в об'ємному варіанті із застосуванням нікелю - компанією Silicon Designs. [5]



"Рис. 11 Фізичні моделі двох перспективних ємнісних -структур датчиків прискорення: а - одновісним поверхнева мікромеханічна структура: 1 - елементарна вимірювальна осередок; 2, 3 - фіксовані обкладання паралельно з'єднаних конденсаторів; 4 - рухома обкладка (палець); 5 - інерційна маса; 6 - пружний елемент, що працює на розтяг; 7 - анкерні точки кріплення; 8 - кремнієва підкладка; а - прискорення в напрямку вимірювальної осі (X); б - асиметрична одновісним мікромеханічна структура, детектуючих прискорення в напрямку Z - осі датчика: 1 - кремнієва підкладка; 2, 3 - фіксовані обкладання двох диференціальних конденсаторів; 4 - елемент - крило

з рухомими обкладинками (обкладанням) конденсаторів - асиметричне крило; 5 - інерційна маса; 6 - кріплення крила до підкладки; 7 - пружний елемент, що працює на кручення; а - прискорення в напрямку вимірювальної осі (Z) "[4]

### **1.3. Технології виробництва ємнісних акселерометрів без використання кремнію**

Існують технології виробництва датчиків прискорення, чутливий елемент яких проводиться на основі нікелю та його сплавів. матеріалів з великою щільністю. Даний вибір матеріалу дозволяє створювати акселерометри для вимірювання як статичного, так і динамічного прискорення з дуже широким діапазоном - від 1g до 20000g. Даний тип сенсорів дозволяє протистояти ударам порядку 10000 g / c і працювати при температурі вище 200° C [6].

Базова структура сенсорного елемента SDI, чутливого до осі Z, показана на рис. 12. Сенсорний елемент являє собою асиметричну плоску обкладку з нікелю, підтримувану вище поверхні підкладки двома стрижнями крутіння, прикріпленими до центрального п'єдесталу.

Одна сторона асиметричною структури важче, ніж інша, тому центр ваги зміщений відносно осі кручення. Під дією прискорення навколо осі кручення рухомий обкладки виникає крутний момент, що повертає крило на кут, що обмежується жорсткістю пружинних стержнів.

На поверхні підкладки під рухомим крилом з кожного боку осі кручення симетрично зафіксовані дві проводять обкладання, що формують диференціальні конденсатори із загальним електродом.

Площа крила становить приблизно  $1000 \times 600$  мкм, його товщина - 5-10 мкм, відстань від крила до підкладки 5 мкм. Ємність кожної з фіксованих обкладок приблизно 0,15 пФ. [6]

При обертанні крила під дією прискорення середня відстань між крилом і однієї обкладкою зменшується, а між крилом і інший обкладкою - збільшується, змінюючи співвідношення ємностей. чутливість

регулюється масою сенсорного елемента, відстанню від центра ваги маси до осі кручення, механічними властивостями пружини кручення (твердістю). Стандартні вимірювальні діапазони акселерометрів SDI -  $1 \times 1000$  g. [6]

Для того щоб забезпечувати додатковий захист від надмірних механічних впливів при високих ударних прискорень, можуть бути додані механічні обмежувачі в чотирьох зовнішніх кутах кожного крила. Кожен закінчений сенсорний чіп SDI включає два крила для формування чотирьох конденсаторів із загальним електродом рис.12.

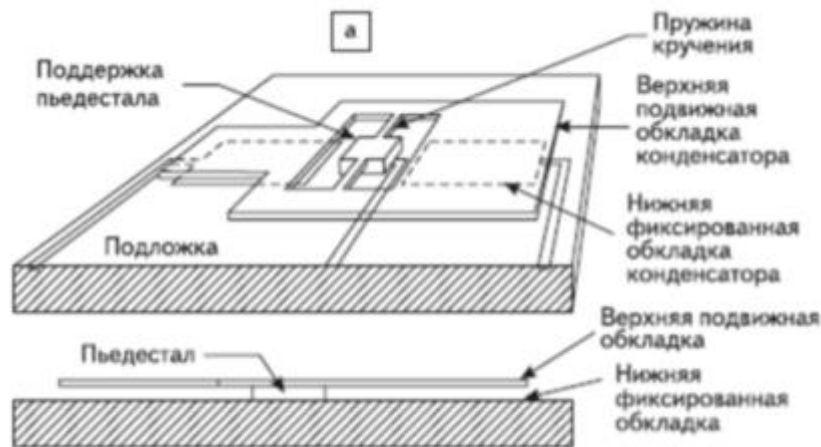


Рис. 12. Технології та спектр продукції нікелевих акселерометрів Silicon Designs а - базова структура сенсорного елемента SDI;



Недоліки пристрою - дуже мала ємність і відповідно мала зміна у вихідному сигналі. Надалі зміна в ємності стає нелінійним. Малий вихідний сигнал і підвищена схильність до нелінійності створюють необхідність в додаткових спеціалізованих мікросхемах. [6]

#### 1.4. Види і особливості стабілізаторів



Рис. 13 Стабілізатори озброєння СВУ

Стабілізатори СВУ-500-3С та СВУ-500-4С застосовуються в системах управління вогнем бойових модулів. Захист продуктів ВТР-І та ВМР.

Стабілізатори можна використовувати для модернізації існуючих та нових легких бронетанкових бойових машин, бронетехніки, БМП, БМД тощо. Призначений для стабільного контролю та підтримки в горизонтальній та

вертикальній площинах поверхні, повітря та поверхневих цілей для ефективного ведення вогню з землі під час руху та навігації.

Стабілізатори пропонують роботу в режимах:

- напіваавтомат (SAS) для прицілювання повітрям;
- Керовані (CEF) для запуску керованих ракет;
- Шукаю (CV) раптовий підхід до мети, обраної командиром;
- готовність (GTV) вводити зброю в бій;
- діагностика (D) автоматична діагностика стану блоків стабілізатора;

Забезпечує:

- швидке відведення вежі;
- Режими кріплення кута навантаження;
- Поверніть озброєний підрозділ у вихідне положення.

Властивості:

- Цифрові стабілізатори останнього покоління, SVU-500-ZC та SVU-500-4C, відрізняються від легко броньованих автомобілів SVU-500, 2E36 та 2E5 2 з управлінням рухом зброї та цифровими видами на сучасній елементарній основі.

- Налаштування стабілізатора можна керувати безпосередньо з панелі керування.

- Інформація про режими роботи відображається в алфавітно-цифровій формі на цифровому дисплеї панелі управління [20].

Характеристики:

Таблиця 1

Діапазон кутів наведення:	
в горизонтальній площині	кругове обертання;
у вертикальній площині	від -7 ° до + 70 °
Потужність приводів вертикального і горизонтального наведення	500Вт
Швидкість наведення в горизонтальній і вертикальній площинах:	
максимальні не менше:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• в режимі ПАР - 35%;</li> <li>• в режимі АВТ - 6%;</li> <li>• в режимі УПР - 0,5%.</li> </ul>
мінімальні не більше:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• в режимі ПАР - 0,1%;</li> <li>• в режимі АВТ - 0,07%;</li> <li>• в режимі УПР - 0,02%.</li> </ul>

Серединна помилка стабілізації, тощо (Кутових хвилин) - не більше	1 (3,6)
Статичні помилки в режимах, тощо (Кутових хвилин), не більше:	
ГТВ	25
ЦУ	15
Неплавним наведення на малих швидкостях не більше	0,3 т.д.
Строк служби:	
гарантійний	7 років
загальний	20 років
Маса не більше:	
СВУ-500-3Ц	65кг
СВУ-500-4Ц	68кг



Рис. 14 Стабілізатор озброєння 2Е36- І

Збройний стабілізатор 2Е36-І призначений для стабілізації та стабілізації вирівнювання в горизонтальній та вертикальній площинах гармат та з'єднаному кулеметі для забезпечення ефективної стрільби в цільові та повітряні цілі.

Особливість - це сучасна основа для перспективних елементів, представлені удосконалення схеми та технічні рішення [20].

режими:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• автомат,</li> <li>• напівавтомат,</li> <li>• цілевказування.</li> </ul>
Діапазон швидкостей наведення, град / с	0,07 - 35
Серединна помилка стабілізації озброєння, тощо, не більше	1,0
Помилка приводу в режимі цілевказівки, град, не більше	2,0
Діапазон кутів на ведення:	
- приводу ВН, град	- 5 ... + 75
- приводу ГН, град	360
Маса, кг, не більше	120
Термін служби, років, не менше	10
Середнє напрацювання на відмову, годин, не менше	500

### Розрахунок ємності ЧЕ

Потрібно розрахувати ЧЕ за таких даних параметрів: частота джерела живлення  $f = 1200 \text{ Гц}$ ; напруга джерела живлення  $U = 2 \text{ В}$ ; площа поверхні пластини  $S = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ ; відстань між пластинами  $\delta = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ; середовище між обкладками ЄП — вакуум.

$$C = \frac{\varepsilon S}{\delta},$$

де  $\varepsilon$  — діелектрична проникність вакууму;

$$\varepsilon = \frac{1}{36 \cdot 10^9 \pi} \text{ Ф/м.}$$

Тоді

$$C = \frac{1 \cdot 3 \cdot 10^{-6}}{36\pi \cdot 10^9 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}} = 53 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 53 \text{ пФ.}$$

### **Розрахунок кутової частоти напруги ЧЕ**

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 1200 = 0,75 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}.$$

### **Розрахунок активного опору ЧЕ**

$$R = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{0,75 \cdot 10^4 \cdot 53 \cdot 10^{-12}} \text{ с}/\Phi = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Ом} = 2,5 \text{ МОм}.$$

### **Розрахунок потужності, розсіяної на активному опорі**

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{2^2}{2,5 \cdot 10^6} \text{ В}/\text{Ом} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}.$$

### **Розрахунок сил зворотного впливу**

$$F = \frac{d}{d\delta} \left( \frac{CU^2}{2} \right) = \frac{U^2}{2} \frac{dC}{d\delta} = \frac{U^2}{2} \frac{C}{\delta} = \frac{2^2 \cdot 53 \cdot 10^{-12}}{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ Н}.$$

## **1.5. Принцип дії ЧЕ**

На рис. 15 показано принципову схему ємнісного ЧЕ.

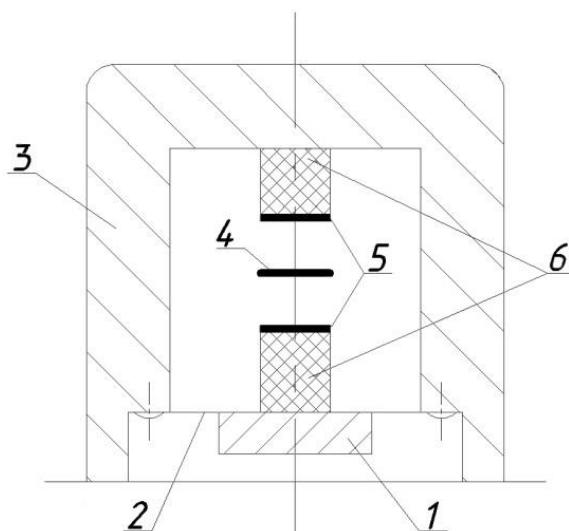


Рис. 15 - Принципова схема ємнісного ЧЕ

Інерційна маса 1 закріплена на жорсткій металевій плоскій мембрані 2, що забезпечує власні коливання підвісу. Нижня обкладка 5 через ізолюючу прокладку 6 з'єднана з мембраною 2, верхня обкладка через ізолюючу прокладку – з корпусом 3.

Для того аби збільшити ємність і запобігти замиканню та/або пробоя, у простір між обкладками конденсатора розміщено твердий діелектрик – тонку слюдяну підкладку 4. Під дією вібрації змінюється відстань між обкладками, а відповідно, і ємність конденсатора.

Позначимо:  $U$  – стала напруга на конденсаторі, В;  $C$  – ємність конденсатора, Ф;  $\delta$  – відстань між обкладками конденсатора, см;  $\omega$  – кутова частота вимірюваного прискорення, рад/с;  $\omega_0$  – власна кутова частота датчика, рад/с. Тобто якщо  $\omega_0$  набагато вища за  $\omega$ , то, нехтуючи загасанням, можна записати

$$\Delta\delta = \frac{A_0 \sin \omega t}{\omega_0^2} = \frac{A_0}{\omega_0^2};$$

$$\Delta U = U \frac{\Delta C}{C} = U \frac{\Delta\delta}{\delta} = \frac{U}{\delta} \frac{A}{\omega_0^2}.$$

У наведених виразах  $A_0 \sin \omega t = A$  – прискорення.

Відповідно, даним приладом ми можемо виміряти прискорення від кількох сантиметрів за секунду ( $\text{см/с}^2$ ) при частотах до 1000 Гц.

Зважаючи на те, що між пластинками конденсатора застосовуються малі відстані, часто потрібно стабілізувати температурний режим датчика, так як температурні деформації деталей можуть призвести до зміни ємності на такий же порядок, як і вимірювані величини.

В даному плані конструкція вимірювальних перетворювачів зі змінною площею пластин раціональніша, оскільки зазначені перетворювачі характеризуються порівняно більшими змінами ємності, ніж ЄП зі змінним зазором.

### 1.6 Математична модель ЧЕ

Вимушені коливання відбуваються у коливальній системі ЧЕ при дії на його чутливу масу прискорення.

Розглянемо коливальну систему ЧЕ, яка може розглядатись, як принципова динамічна схема на рис. 16.

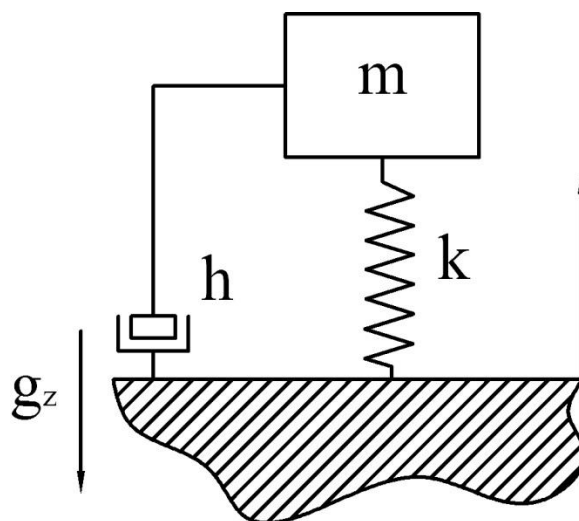


Рис. 16 - Коливальна система ЧЕ



Запропонована схема є справедливою за певних умов:

- рух маси  $m$  розглядаємо в інерціальній системі відліку і відповідно він відбувається тільки в одному напрямку – вздовж осі, перпендикулярної площині встановлення ЧЕ;
- опора,  $m$  та інші складові ЧЕ є недемпфованими;
- маса пружного елемента набагато менша за  $m$ ;
- маса чутливого елемента, коефіцієнт пружності та демпфування є незмінними у часі.

Рівняння руху ЧЕ має вигляд:

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + kx = ma_z,$$

де  $m$  – маса чутливого елемента;  $h$  – коефіцієнт затухання;  $k$  – коефіцієнт пружності, який залежить від властивостей ЧЕ.

Враховуючи інерційність перших двох складових, можна вважати, що

$$x = \frac{1}{\omega_0^2} a_z.$$

Якщо розділити рівняння (1.35) на  $m$ , то отримаємо:

$$\ddot{x} + 2 \cdot \xi \omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x = a_z,$$

де  $\xi$  – коефіцієнт демпфування;  $\omega_0^2$  – власна частота ЧЕ.

## **Висновки до першого розділу**

На підставі проведеного аналізу літератури можна зробити наступні висновки:

- найбільший практичний інтерес представляють ємнісні MEMS - акселерометри виконані за технологією поверхневої мікротехніки:
- основними перевагами акселерометрів є широкий діапазон вимірювань, низькі шуми, малі габаритні розміри, невисока ціна:
- основними параметрами ММА є діапазон вимірювань, чутливість, основна похибка, діапазон робочих температур, дрейф нуля.

Для подальшого розрахунку і проектування MEMS-акселерометра виберемо осьову схему підвісу ЧЕ з складчастої пружиною і ємнісну електродну структуру перетворювача. Діапазон вимірювань 50g. Основна похибка не більше 3% в нормальних лабораторних умовах.

## **РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЄМНІСНОГО МЕМС АКСЕЛЕРОМЕТРА**

У розглянутій літературі [5-9] відсутні будь-які експериментальні дослідження ємнісного МЕМС акселерометра (ДЄА). Тому **метою** даного розділу є здійснення такого дослідження.

**Задачами** розділу є: створити експериментальну установку для дослідження основних характеристик ДЄА та обґрунтувати можливість його застосування у складі АГС; зробити конструктивний та аналітичний описи кожної складової експериментальної установки; проаналізувати програмне забезпечення для відображення результатів досліджень на ЕОМ; провести експериментальні дослідження та побудувати графіки основних необхідних залежностей; викласти методику і рекомендації з проведення випробувань ДЄА у складі АГС.

У публікаціях автора [12-14] показано вирішення цих задач.

### **2.1. Опис експериментальної установки для досліджень МЕМС ДЄА**

Для проведення експериментальних досліджень ДЄА була створена експериментальна установка, принципова схема та фото якої зображені на рис.5.1 та рис. 5.2 відповідно. До її складу входять наступні прилади: генератор механічних коливань ВУ-15М (вібростенд) із вбудованими в нього двома індукційними перетворювачами електричного сигналу у механічний; ДЄГ, який розташований безпосередньо на вібростенді; мікросистема зібрання даних (модуль введення-виведення); блок підсилення вихідного сигналу ДЄГ; ЕОМ; генератор змінної напруги та вольтметри для реєстрації напруги генератора та напруги індукційного перетворювача відповідно [5].

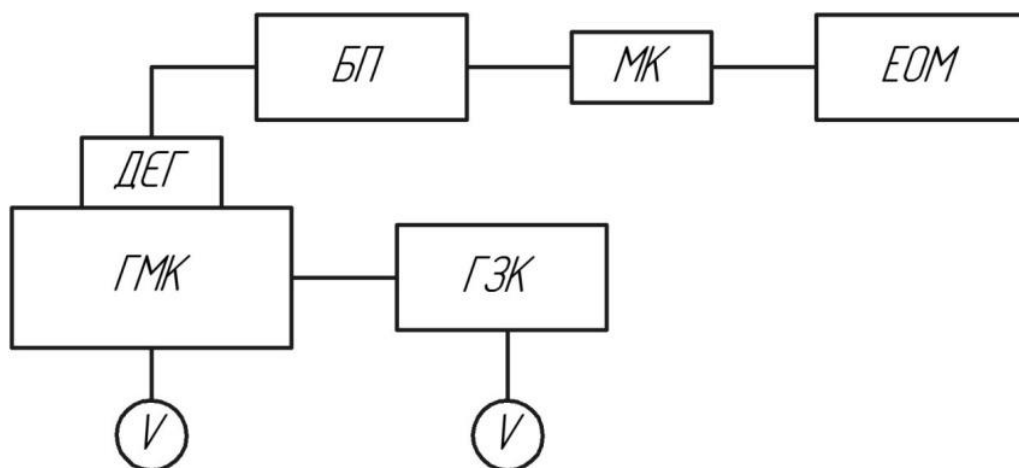


Рис.17. Принципова схема експериментальної установки ДЄА:

ГМК – генератор механічних коливань; ДЄА – трьохвісьовий ємнісний акселерометр; БП – блок підсилення вихідного сигналу ДЄА; МК – мікросистема зібрання даних (модуль введення-виведення); ЕОМ; ГЗК – генератор змінної напруги живлення; V – вольтметр для реєстрації напруги



Рис.18. Фото експериментальної установки ДСА

### **2.1.1. Вібростенд експериментальної установки**

*Мета застосування.*

Вібростіл ВУ-15М (рис.19) служить для генерування механічних коливань, які відповідно до виробничих умов надходять на практиці. Вібростіл сприймає кінцеві, конструктивні і сильно навантажені стандартні елементи на їх поведінку при тимчасових струсах [6].

*Технічні дані* вібростенду наведені в табл. 2.1.

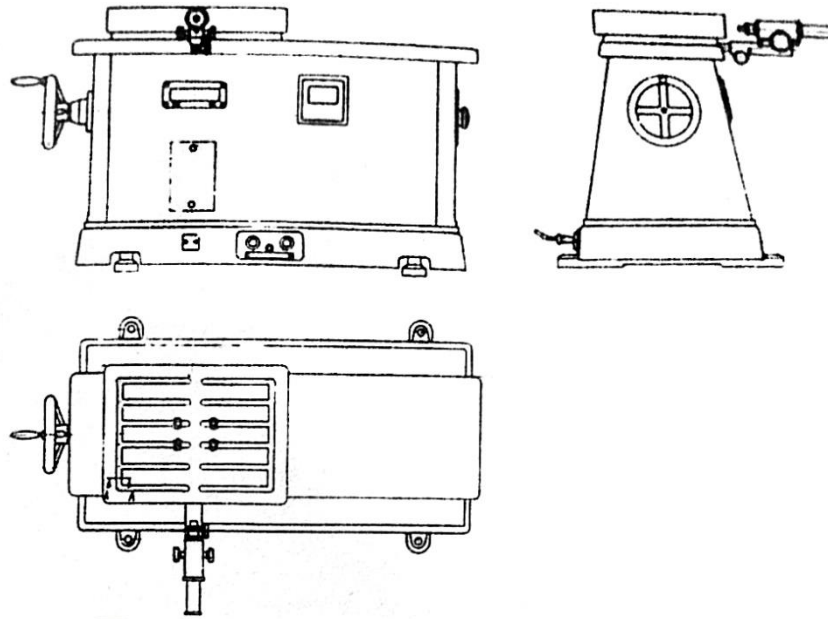


Рис. 19. Вібростіл ВУ-15М

#### *Технічна конструкція.*

Корпус 1 складається з чавунного лиття. До нього належать фундаментна плита, три бічні стіни і верхня покриваюча плита 7. На основі нової конструкції корпус забезпечує хорошу доступність до більшої кількості стандартних елементів, внаслідок чого полегшується контроль і догляд. Дві плити, на передній знаходяться інструменти та вимикачі, закривають стіл і захищають його від сторонньої маніпуляції (рис. 19.).

У корпусі на правій стороні розташовані приводний двигун 19 із прифланцьованим тахогенератором 16 і реле 18. Вони регулюються трансформатором 14. Ліво - і правоколивальна системи висять в утримуючих пружинах 13. Система складається зі столу для установки 8 випробуваного об'єкта зі прифланцьованою рамою столу 9, випробуване тіло є головною масою М1, чавунної контрмаси М2 і вбудованого ексцентрикового валу 3.

Таблиця 2.1.

## Технічні характеристики вібростолу

Назва	Характеристика
Модель	ВУ-15М (рис. 5.8.)
Рік випуску	1972
Частота вібрації	1-100 Гц
Маса випробовуваних виробів	не більше 20 кг
Прискорення вібраційних навантажень	3-150 м / с <sup>2</sup>
Амплітуда вібрації	0,1-2,2 мм
Коефіцієнт нелінійних спотворень	не більше 10%
Напруга живлення стенду	220 В
Розміри стола	400х300 мм
Маса стенду	110 кг

Маси М1 і М2 пов'язані двома парами пружин 12 і послідовно з'єднані за допомогою пружинного повзунка 10.

Пружинні повзунки знаходяться на регульованому шпинделі 6 з лівою і правою винтовими різьбами. Обертанням маховика 5, який за допомогою універсальних шарнірів з'єднаний з шпинделем 6 і таким чином є значно захищеним від впливів коливань, можна переміщати пружину симетрично повзунка 10. Цим робочі пружини 12 змінюються щодо своєї діючої довжини і одночасно і щодо постійної С. Таким чином досягається при довгій пружині низька або ж при короткій пружині висока власна частота загальної коливальні системи.

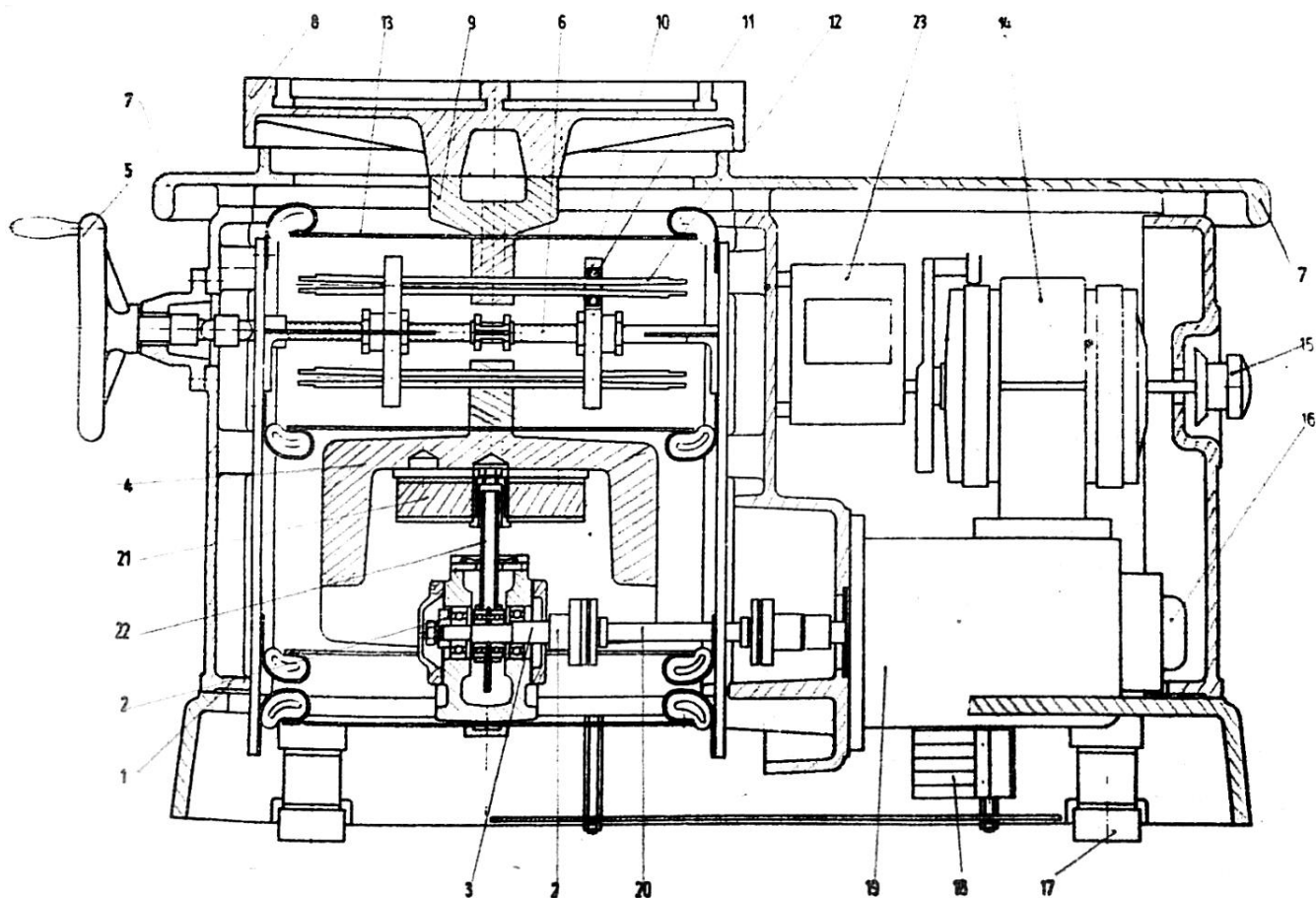


Рис. 20. Креслення вібростолу: 1 - корпус; 2 - контрваги; 3 - ексцентриковий вал; 4 - контрмаса; 5 - маховик; 6 - перестановочний шпindel; 7 - верхня перекриваюча плита; 8 - стіл для прикріплення об'єкта; 9 - рама столу; 10 - пружинні повзунки; 11 - ковзаючі ролики; 12 - дві пари пружин; 13 - підтримуюча пружина; 14 - регулювальний трансформатор; 15 - поворотна кнопка; 16 - датчик числа обертів; 17 - ножні рейки з гумовим буфером; 18 - реле; 19 - приводний двигун; 20 - зчеплення; 21 - збудлива пружина; 22 - ексцентриковий штовхач; 23 - тримач вимірювального приладу; 30 - щит з написом «увага»; 31 - шкала довжини пружин; 32 - вимірювальний клин; 33 - частотомір; 34 - контрольна лампа; 35 - натискна клавіатура "включ."; 36 - натискна клавіатура "вимикач."; 37 - тримач мікроскопа, угвинчується; 38 - затискна гільза; 39 - затискний гвинт; 40 - мікроскоп; 41 - зубчастий привід



мікроскопа; 42 - ортоскопічний окуляр 17х із вбудованим окулярним мікрометром; 43 - об'єктив 3х.

Збудження коливань двохмасової системи відбувається через прогумований метал 21, що працює як збудлива пружина: за допомогою розташованого в контрмасі ексцентрика 3 через ексцентриковий штовхач 22. Ексцентрик приводиться в дію через зчеплення 20 електродвигуном 19 з регульованою напругою при максимально 18000 об/хв., Відповідно 300Гц [95].

За допомогою поворотної кнопки 15 регульовального трансформатора 14 можна змінити напругу двигуна і таким чином встановити бажане число обертів або ж частоту.

Прифланцьований до двигуна тахогенератор 16 піклується про необхідну для показання частоту напруги, яка показується на вимірювальному приладі 33 в Гц.

Загальна коливальна система висить в корпусі 1 на чотирьох розташованих один над одним утримуючих пружинах 13, що представляють собою тонкі плоскі пружини, підтримувані вигнутою пружинною 8 скобою. Але в порівнянні з робочими пружинами ці підтримуючі пружини є дуже м'якими і на основі свого конструктивного розташування вони забезпечують хорошим управлінням віброуючу стільницю 8 у вертикальному напрямку. Загальний вібростіл встановлений на двох настановних планках 17, з'єднаних з корпусом еластичним чином чотирма гумовими буферами. Таким чином абсорбуються передачі можливих незначних коливань корпусу на місце знаходження і окружність.

*Принцип дії.*

Вібростіл ВУ-15М сконструйований як двомасовий вібратор, принцип якого впливає з рис.5.5.

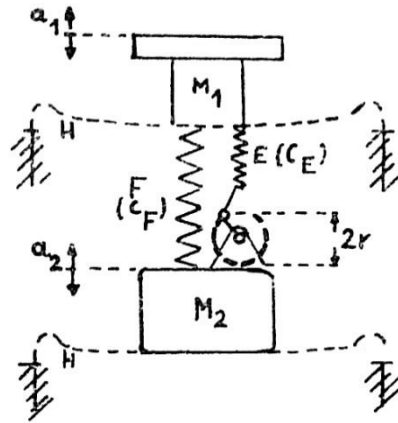


Рис. 21. Схематичне зображення двомасового вібратора

$M_1$  - основна маса;  $M_2$  - контрмаса;  $F$  - пружня ланка з постійною пружиною;  $E$  - збудлива пружина;  $a$  - амплітуда

При дії простим чином можна змінити власну частоту перестановкою діючої довжини пружини. Незважаючи на постійну ексцентричність існує можливість встановити кожну амплітуду стільниці всередині допустимих граничних значень.

*Прикріплення випробувального об'єкта.*

Випробувальний об'єкт (ДСА) за допомогою гвинтів прикріплюється до стільниці (рис. 22). Допустима максимальне навантаження складає 30 кг включно всіх пристосувань для кріплення.

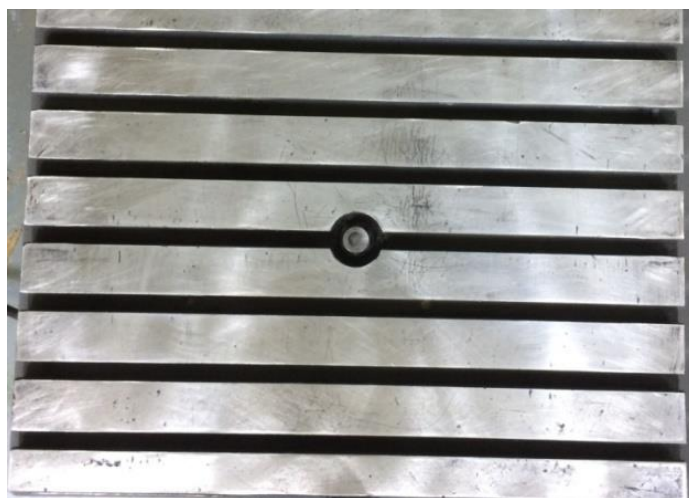


Рис. 22. Стільниця вібростола

*Приведення в дію.*

Після підключення випробувального об'єкта до мережі, ручка регулювального трансформатора встановлюється на нуль до лівого упору. При першому випробуванні приладів по можливості коротко встановити робочі пружини. Довжина пружини змінюється обертанням маховика 5, але ніколи не робити цього при вимкненому приладі.

З метою захисту вібростола при розгоні від перевищення резонансу в цьому положенні реле 18 піклується про те, щоб двигун тільки спрацьовував при нульовому положенні регулювального трансформатора. Тільки потім обслуговується натискна клавіатура 35 "включити". Спалахує контрольна лампа 34, внаслідок чого підтверджується готовність вібростола до експлуатації. Після цього ручка 15 повільно повертається направо, але після розгону відразу трохи встановлюється назад, щоб число оборотів не стало занадто високим.

### *Встановлення частоти.*

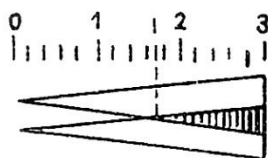
Частота вібростола лінійно змінювана з числом оборотів двигуна і встановлюється регулювальним трансформатором 14. Амплітуда регулюється зміною числа власних коливань робочих пружин.

З метою зміни числа власних коливань довжина пружини скорочується або ж подовжується обертанням маховика 5. При цьому висока власна частота відповідає короткій установці пружини і низька власна частота довгою установці пружини. Так як загальний діапазон перестановки від меншого 7,5 см до більшої відстані роликів становить приблизно 75 обертів, забезпечується зміною довжини пружини і таким чином точною установкою бажаної амплітуди. Можна відраховувати встановлену довжину пружини спереду в лівому вікні шкали 31.

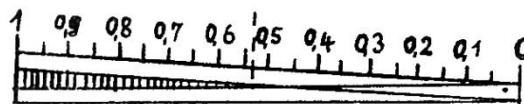
При регулюванні частоти і амплітуди перевищити критичні значення максимальних значень можна лише короткочасно, тому що вібростіл може бути пошкоджено. Тому необхідно уникати дії в резонансі. Для цієї мети при регулюванні тільки повільно підвищувати число обертів двигуна і встановити його таким чином, щоб не відбулося резонансу.

### *Вимірювання амплітуди.*

Для вимірювання амплітуди слугують розташовані на торцевій стороні стільниці вимірювальні клини 32 (рис. 23) Або вимірювальний мікроскоп 40. Є доцільно вимірювати великі амплітуди за допомогою вимірювальних клинів і менші мікроскопом.



а)



б)

Рис. 23. Вимірювальні клини: а - для великих амплітуд; б - для маленьких амплітуд

Мікроскоп 40 за вільним вибором можна прикріплювати через затискні гільзи 38 за допомогою натискного гвинта 39 до угвинчуватися на стільниці держателю 37. Мікроскоп 40 забезпечений мобільним ортоскопічним окуляром 17х42, вбудовуваним окулярним мікрометром 10:100 і об'єктивом 3х43. Масштаб зображення окулярного мікрометра складає 33 мм по значенню шкали.

Точна установка проводиться через зубчастий привід 41. Для вимірювання спершу окулярний мікроскоп слід встановити на різкість перестановкою лінзи окуляра 42, щоб окремі ділянки були ясно видними. Потім за допомогою зубчастого приводу проводиться установка мікроскопа на різкість, а саме установка на розташовану на лицьовій стороні стільниці маркування. Маркування складається з пластилінової частинки з металом, яка притискається до лицьовій стороні стільниці відповідно висоті мікроскопа. Освітленням пластиліном при стані спокою з'являться світлові точки в мікроскопі. Після установки на різкість і оцінки величини точок окулярним мікрометром з'явиться при русі штрих, висота якого визначається [6].



Рис. 24. Вібростенд (зовнішній вигляд без мікроскопа)

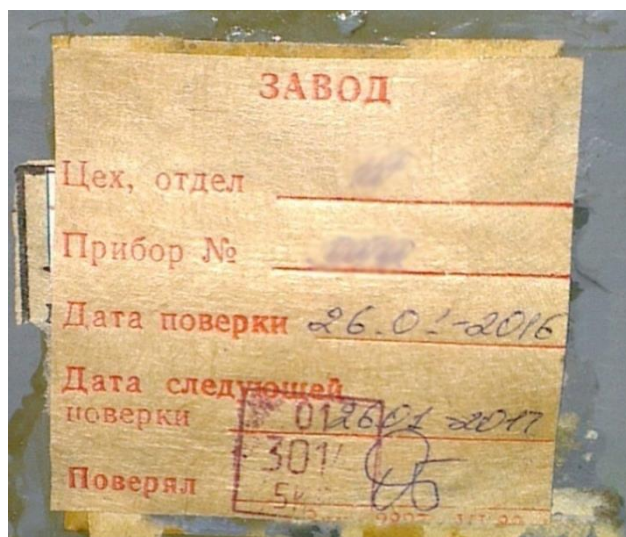


Рис. 25. Дата повірки вібростенду

### 2.1.2. Досліджуваний ДЄА

В якості двохканального ємнісного MEMS гравіметра в роботі використано два ідентичних ємнісних MEMS акселерометра MMA8452Q (рис. 26).

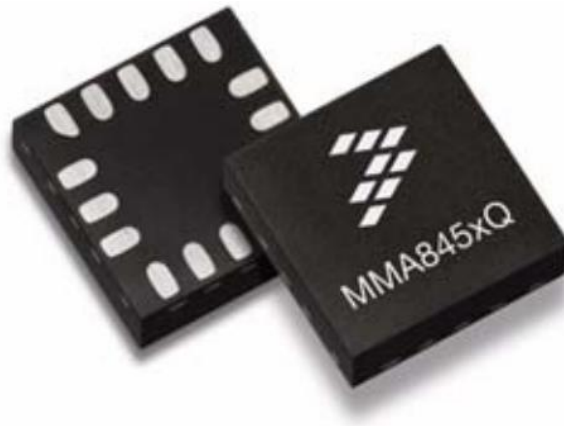


Рис. 26. Досліджуваний ДЄА (трьохосьовий цифровий акселерометр MMA8452Q)

Трьохосевий цифровий акселерометр MMA8452Q є мініатюрним з низьким енергоспоживанням, ємнісним мікромеханічним акселерометром. Вбудовані функції переривання дозволяють економити електроенергію звільняючи хост-процесор від безперервного опитування.

MMA8452Q може працювати при навантаженнях  $\pm 2g$  /  $\pm 4g$  /  $\pm 8g$  у діапазоні високих частот. Акселерометр запакований в корпусі QFN 3мм x 1 мм x 3мм. Має доступний фільтр високих частот даних в режимі реального часу, здатний до само тестування, відповідає RoHS [7].

*Технічні характеристики* трьохосьового цифрового акселерометру MMA8452Q наведені в табл. 2.2.

Технічні характеристики ММА8452Q

Назва	Характеристика
Напруга живлення	1,95 В до 3,6 В
Напруга інтерфейсу	1,6 В до 3,6 В
Діапазон g	$\pm 2g$ / $\pm 4g$ / $\pm 8g$
Діапазон частот	від 0,1 Гц до 800 Гц
Виходи	12-бітові і 8-бітний цифровий вихід
Кількість каналів виявлення руху	3

Внутрішня будова ДСА представлена на рис.27-28. Як бачимо, інерційна маса прикріплена до кристалу за допомогою пружних підвісів. Нерухомі електроди розташовуються праворуч і ліворуч від рухомих електродів за рахунок зустрічно-штирьового розташування.

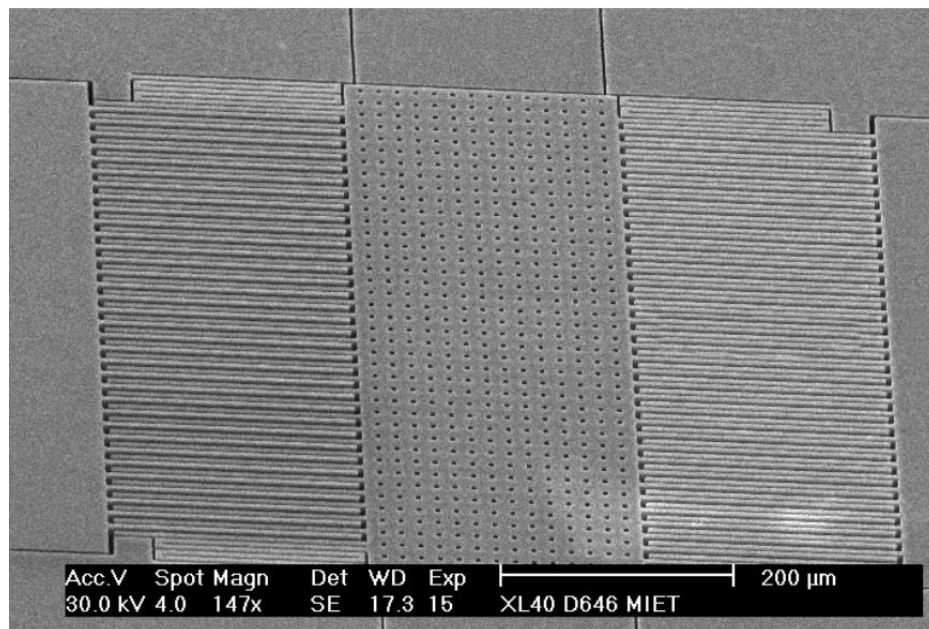


Рис. 27. Внутрішня будова ДСА інерційна маса з електродами



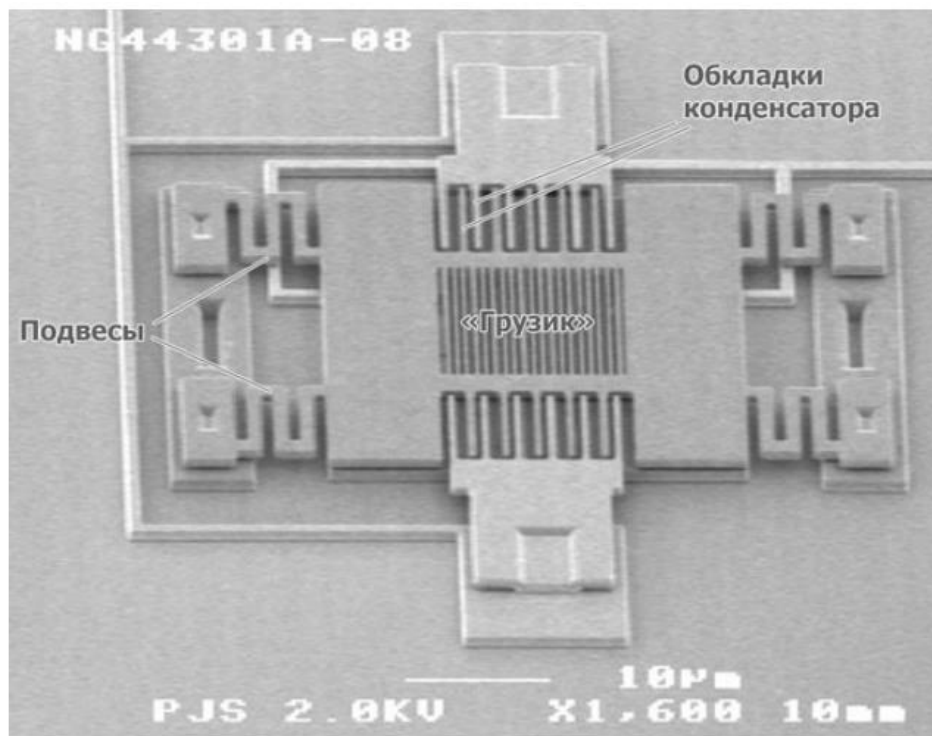


Рис. 28. Внутрішня будова ДЄА загальний вид

### Операційний підсилювач

Для підсилення вихідного аналогового сигналу з ДЄА використовуємо розроблений блок підсилення (рис. 29.).

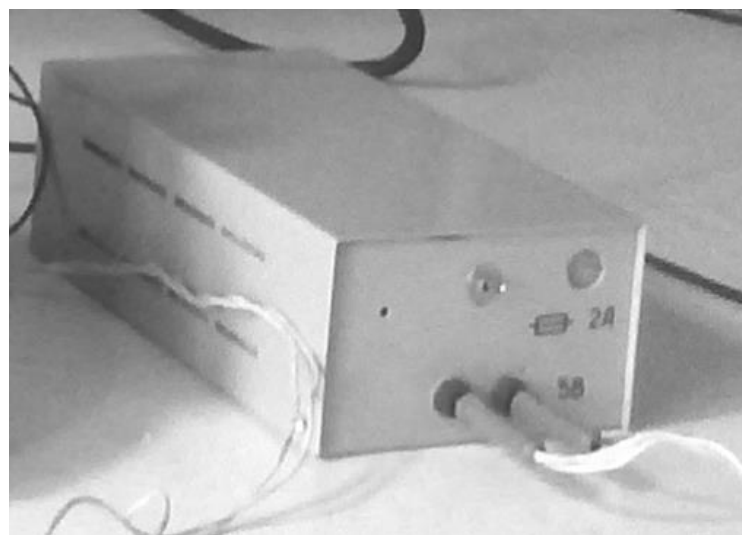


Рис. 29. Блок підсилення вихідного сигналу ДЄА

Основною складовою блоку підсилення є підсилювач INA116 [8] (рис. 5.30) із застосуванням зведеного операційного підсилювача (ОП)  $A_1$  із малим вхідним струмом і прецизійного ОП  $A_2$  (рис. 5.31). Така схема забезпечує ефективне придушення синфазної перешкоди (шумів) та забезпечує максимальну чутливість вимірювальної системи.

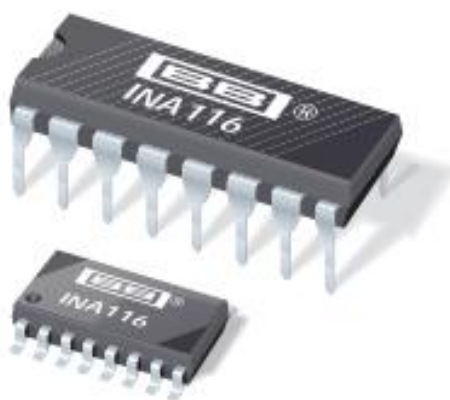


Рис. 32. Підсилювач INA116

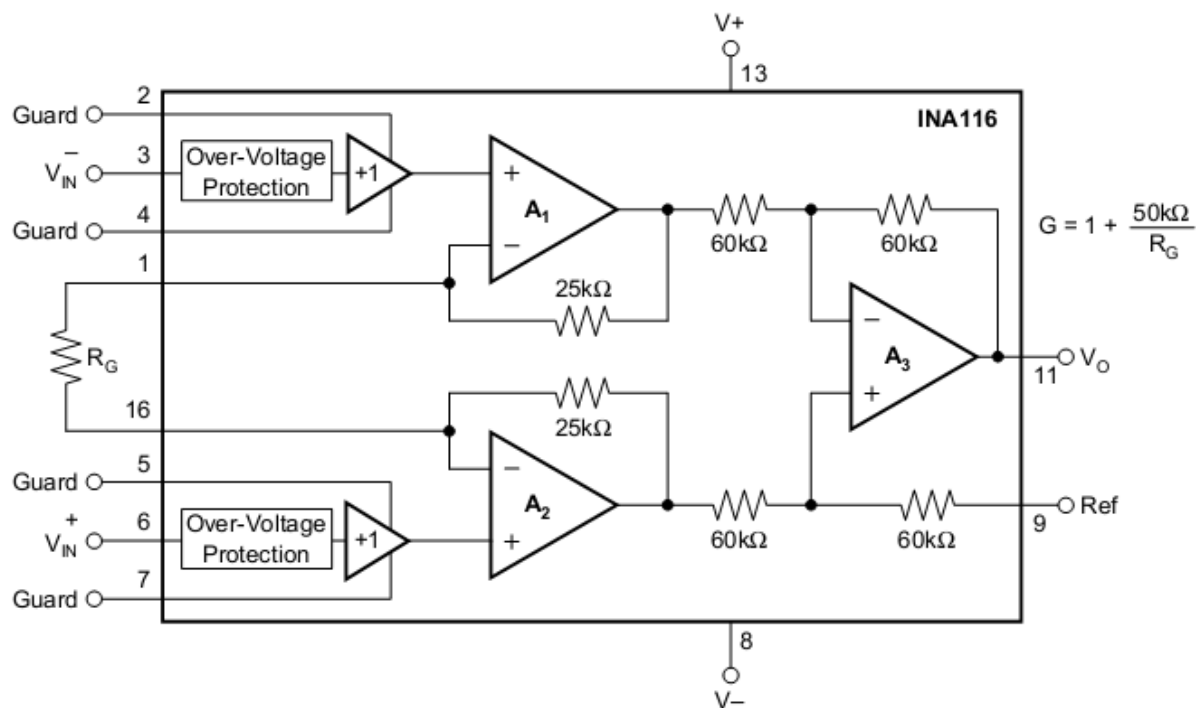


Рис. 33. Принципова електрична схема підсилювача INA116

Основні параметри, характеристики та рекомендації по експлуатації підсилювача INA116 наведені у [8]. Коефіцієнт підсилення розробленого блоку підсилення вихідного сигналу ДЄА дорівнює 1, а вихідна напруга 0–5 В.

### **2.1.3. Зчитувальний та оброблюваний пристрій**

#### **2.1.3.1. Мікросистема збирання даних**

При проведенні експерименту, використовувалась мікросхема збирання даних MMA845X (рис. 34.), до якої було прикріплено досліджуваний ДЄА.

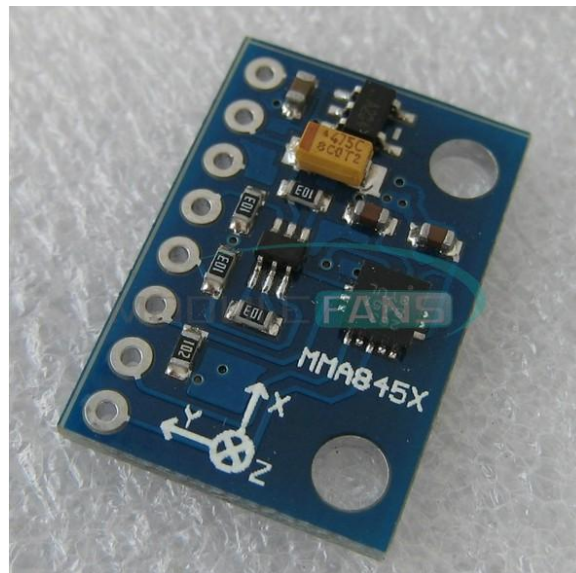


Рис. 34. Мікросистема збирання даних m-DAQ

Вона має розміри: 14.5мм x 20.5мм і підключена до мікроконтролера Uno R3, що обробляється через програмне середовище Arduino. Ардуіно використовується для програмування досліджуваного пристрою. На відміну від персональних комп'ютерів, Ардуіно не перевантажені додатковими

інтерфейсами і орієнтовані на безпосередню взаємодію з об'єктом. Ардуіно - це відкрита апаратна платформа для програмування різних фізичних об'єктів. Фактично, це плата з мікроконтролером, і програмне середовище для написання програмного коду для запуску мікроконтролера.

Мова програмування пристроїв Ардуіно заснована на C/C++ і скомпонована з бібліотекою AVR Libc і дозволяє використовувати будь-які її функції. Разом з тим вона проста в освоєнні, і на даний момент Arduino - це, мабуть, найзручніший спосіб програмування пристроїв на мікроконтролерах [9].

### **2.1.3.2. Мікроконтролер Arduino Uno R3**

Arduino Uno (рис. 34) - це пристрій на основі мікроконтролера ATmega328. У його склад входить все необхідне для зручної роботи з мікроконтролером: 14 цифрових входів/виходів (з них 6 можуть використовуватися в якості ШИМ-виходів), 6 аналогових входів, кварцовий резонатор на 16 МГц, роз'єм USB, роз'єм живлення, роз'єм для внутрисхемного програмування (ICSP) і кнопка скидання. Для початку роботи з пристроєм досить просто подати живлення від AC/DC-адаптера або батарейки, або підключити його до комп'ютера за допомогою USB-кабелю [9].

На відміну від всіх попередніх плат [10] Ардуіно, Uno в якості перетворювача інтерфейсів USB-UART використовує мікроконтролер ATmega16U2 (ATmega8U2 до версії R2) замість мікросхеми FTDI.

На платі Arduino Uno версії R2 для спрощення процесу оновлення прошивки доданий резистор, що підтягує до землі лінію HWB мікроконтролера 8U2.

Технічні характеристики плати Arduino Uno версії R2 наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3.

Технічні характеристики плати Arduino Uno R2

Назва	Характеристика
Робоча напруга	5В
Напруга живлення (рекомендована)	7-12В
Напруга живлення (гранична)	6-20В
Цифрові входи / виходи	14 (з них 6 можуть використовуватися в якості ШИМ-виходів)
Аналогові входи	6
Максимальний струм одного виведення	40 мА
Максимальний вихідний струм виводу	3.3V 50 мА
Flash-пам'ять	32 КБ (ATmega328)
Тактова частота	16 МГц
Країна виробник	Італія
Розмір	68 x 53 x 15 мм



Рис. 35. Зовнішній вигляд плати Arduino Uno версії R2 [10]

Код програми запуску ДСА наведено нижче:

```
#include <AccelerometerMMA8451.h>

#include <Adafruit_MMA8451.h>

#include <Wire.h>

#include "Accelerometer.h"

#include "AccelerometerMMA8451.h"

AccelerometerMMA8451 acc1(0);

AccelerometerMMA8451 acc2(1);

void setup()

{

    Serial.begin(9600);

    acc1.standby();

    acc1.setDynamicRange(AccelerometerMMA8451::DR_2G);
```

```

    acc1.activate();

    acc2.standby();

    acc2.setDynamicRange(AccelerometerMMA8451::DR_4G);

    acc2.activate();

}

float a,d,c;

void loop()

{

a=acc1.readZg();

d=acc2.readZg();

c=a+d;

    Serial.print("    z1: ");

    Serial.print(a,5);

    Serial.print("    z2: ");

    Serial.print(d,5);

    Serial.print("-----");

    Serial.println(c,5);

    delay(100);

}

```

Значення й список всіх змінних та операторів можна знайти по посиланні  
<http://arduino.ua/ru/prog/>

На рис. 36 показане фото тестування ДЄА підключеного до ЕОМ.

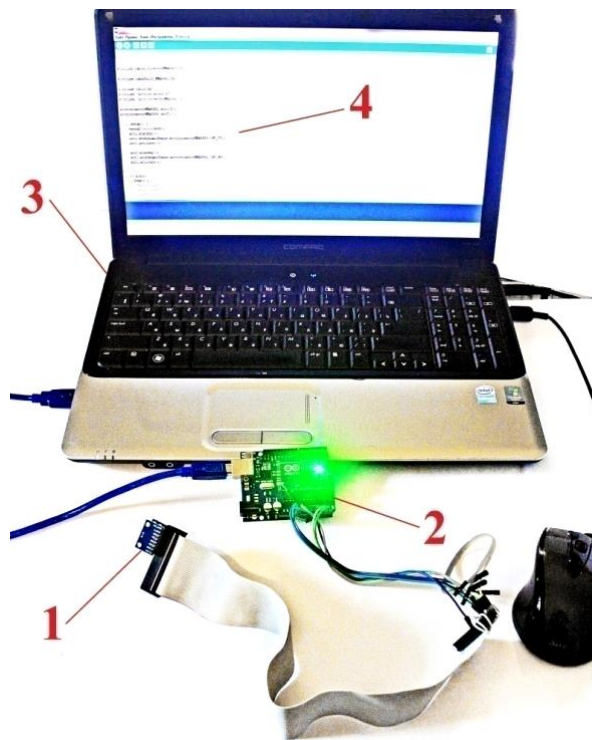


Рис. 36. Тестування ДЄА: 1 - ДЄА (мікросхема з встановленим на ній ЄА); 2 – мікроконтроллер; 3 – ПК; 4 – код програми.

## 2.2. Візуалізація результатів досліджень МЕМС ДЄА

Візуалізація результатів дослідження проводиться програмою SFMonitor.

SFMonitor - програма для візуалізації потоків даних з послідовного порту. SFMonitor має три формату даних: Простий (Simple), Функція  $y(t)$  (*Complex  $y(t)$* ), Функція  $y(x)$  (*Complex  $y(x)$* ).

У режимі "Простий", монітор приймає потік одно-байтових величин. При цьому, з отриманого кожен момент пачки байт відбирається тільки останній. Режими Функція мають на увазі передачу пакетів певного формату. У режимі



Функція  $v(t)$  монітор бере тільки одне значення з кожного пакета. При цьому, будується графік  $v(t)$ , де  $t$  - час отримання пакету.

Для Arduino з використанням бібліотеки SerialFlow, що здійснює відправку показань MEMС ДЄГ, у нашому випадку, на моніторі слід вибрати режим *Complex*  $v(t)$ .

Програма для візуалізації даних акселерометра MMA8452Q має код:

```
static const byte PACKET_SIZE = 1;

static const byte VALUE_SIZE = 2;

static const boolean SEPARATE_VALUES = true;

#include <SerialFlow.h>

#include <Wire.h>

#include <Adafruit_Sensor.h>

#include <Adafruit_MMA8452Q_U.h>

Adafruit_MMA8452Q_Unified accel = Adafruit_ADXL345_Unified(12345);

SerialFlow rd(&Serial); // RX, TX

void setup() {

    rd.setPacketFormat(VALUE_SIZE, PACKET_SIZE, SEPARATE_VALUES);

    rd.begin(115200);

    accel.begin();

    accel.setRange(MMA8452Q_RANGE_2_G);

}

void loop() {
```

```

sensors_event_t event;

accel.getEvent(&event);

rd.setPacketValue(event.acceleration.x);

rd.sendPacket();

delay(10);

}

```

### 2.3. Градувальна характеристика ДЄА

Операція, при проведенні якої, засіб вимірювань чи вимірювальний прилад забезпечується шкалою або градувальною таблицею (кривою) називається градуванням [4]. Щоб проградувати пропонований ДЄА використаємо установку (рис. 37), до складу якої входять: оптична ділильна головка 1, ДЄА 2, встановлений на кронштейні 3, блок підсилення 4, модуль введення-виведення 5 та ЕОМ 6

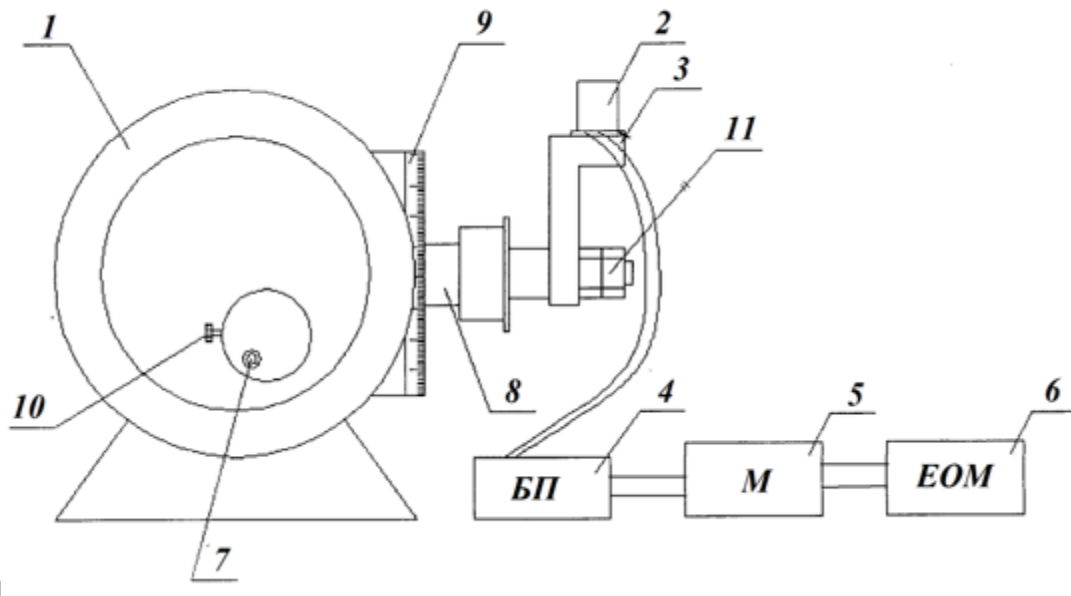


Рис. 37. Експериментальна установка для градуювання : 1 – оптична ділильна головка; 2 – ДЄА; 3 – кронштейн; 4 – блок підсилення; 5 – модуль введення-виведення; 6 – ЕОМ; 7,10 – поворотні ручки; 8 – вал; 9 – відлікова шкала; 11 – прижимні гайки

Градування ДЄА відбувається при нахилі його вимірювальної осі  $OZ$  за допомогою оптичної ділильної головки на деякий кут  $z$  (рис. 38). Градування ДЄА реалізується за допомогою поворотної ручки 7 оптичної ділильної головки 1. При цьому повертається вал 8, кронштейн 3, а також закріплений на кронштейні ДЄА 2. Кут повороту  $z$  керується по відліковій шкалі 9. Вихідний сигнал ДЄА 2 відображається на ЕОМ 6.

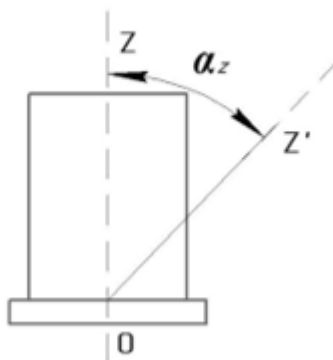


Рис. 38. Кут нахилу ДЄА АГС

Таблиця 2.4

Градувальна таблиця ДЄА АГС

№	$\alpha_z$ , град	$g_{zЕКСП}$ , мГал	$g_{zТЕОР}$ , мГЛ	Відхилення експерт. від теорет. по модулю, мГал	Відхилення від поточного значення, %
1	2	3	4	5	6
1	0	981100.375	981100.376	0.001	0
2	10	966195.234	966195.257	0.023	1.52
3	20	921932.665	921932.784	0.119	6.03
4	30	849658.072	849657.849	0.223	13.39
5	40	751566.893	751566.491	0.402	23.40
6	50	630639.662	630639.161	0.501	35.72
7	60	490549.470	490550.188	0.718	50.01
8	70	335556.981	335556.091	0.890	65.79
9	80	17365.725	17364.818	0.907	98.23
10	90	0	0	0	100

Отримані результати  $g_{zЕКСП}$  градування ДЄА експериментальним шляхом відображені у табл. 2.4. Порівнявши їх із аналітичними розрахунками ( $g_{zТЕОР} = g \cdot \cos \alpha_z$ ) можна побудувати графік залежності сигналу ДЄА  $g_z$  від кута повороту  $\alpha_z$  (рис. 39).

Як видно із табл. 2.4, різниця між відхиленнями вимірювальної осі ДЄА автоматизованої АГС на кут  $\alpha_z$  обчисленими аналітично та отримані експериментально не перевищує 0,5 м/с\*с. Кут повороту його вимірювальної осі відносно довідкової вертикалі впливає прямо пропорційно на його вихідні покази та величину його похибки.

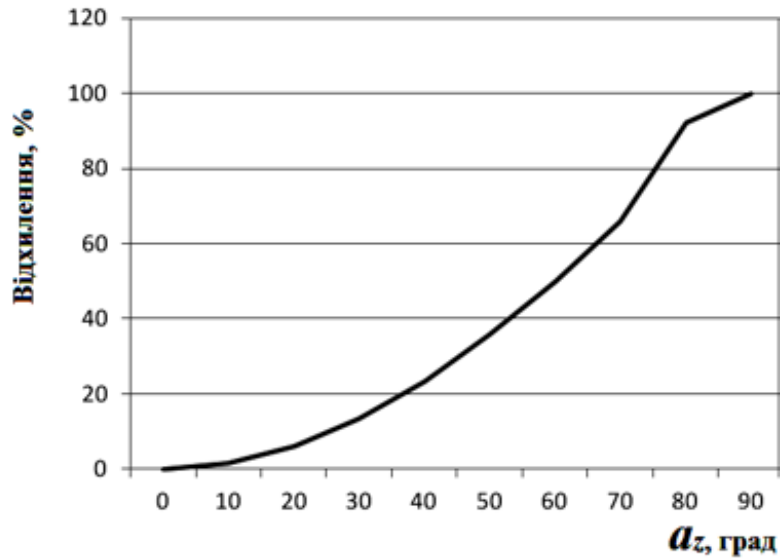


Рис. 40. Графік залежності відхилення вимірювальної осі ДЄА  $\alpha_\varepsilon$  від відхилення від поточного значення прискорення сили тяжіння

Оскільки гравіметричні вимірювання проводяться на рухомій у просторі основі, тому необхідно постійно забезпечувати збіг вимірювальної осі ДЄГ АГС із довідковою вертикаллю. Для реалізації цього процесу запропоновано побудувати систему стабілізації АГС, яка забезпечує рівень допустимої похибки стабілізації осі чутливості ДЄА у положення вертикалі у межах 0.5–15 кут. хв.

## 2.4. Визначення базових параметрів роботи макету

Установка розташована у КПІ ім. Ігоря Сікорського, але експеримент проводився в ПАТ «НВО «КЗА», GPS координати якого: довгота: 28.637409<sup>0</sup>; широта: 50.244460<sup>0</sup>.

За цими координатами, згідно [11]:

$$\gamma_0 = \gamma_{0e}(1 + 0.0052884 \sin^2 \varphi - 0.0000059 \sin^2 2\varphi),$$

знаходимо довідкове значення прискорення сили тяжіння  $\gamma_{ЖДТУ}$ :

$$\gamma_{КЗА} = 9.78049 (1 + 0.0052884 \sin^2(50.244460)) - 0.0000059 \sin^2(2 \cdot 50.244460) = 9.81100376 \text{ м/с}^2. \quad (2.1)$$

Досліджуваний акселерометр встановлювався вертикально. Випробування проводились на вібростенді, зображеному на рис. 24.

## 2.5. Проведення експерименту

З урахуванням динамічних зон літака акселерометра АГС треба розташовувати у зоні, віддаленій від двигунів або гвинтів, яка відповідає групам виконання IV, V, V/IV[4] і містить: для літаків з турбореактивними (ТРД) двигунами та двигунами біля фюзеляжу – частини літака, розташовані попереду площини повітрозабірника двигуна, за винятком кінців крил; для літаків з ТРД та двигунами на крилах – фюзеляж за винятком частин, які піддаються дії шуму струменя двигунів і визначених умов ( $30^\circ$ ) від осі двигунів; для літаків з турбогвинтовими двигунами (ТГД) – фюзеляж і центроплан за винятком зони гвинтів і частин, що належать до кінцевої зони.

Дані, які фіксувались й оброблювались у ЕОМ, а також результати їх обробки представлені у табл. 2.5. Через приблизно 10 с спостереження проводилась обробка на ЕОМ.

Розраховано для кожного випадку систематичну похибку  $\Delta_g$ :

$$\Delta_g = \left| \overline{g_{експ}(t)} - \gamma_{ЖДТУ} \right|, \quad (2.2)$$

де  $\overline{g_{експ}(t)}$  – середнє значення вихідного сигналу ДЄГ отримане у ході експерименту за період спостереження 10 с:

$$\overline{g_{експ}}(t) = \frac{1}{N_{експ} + 1} \sum_{i=0}^{N_{експ}} \overline{g(t_i)}, \quad (2.3)$$

де  $N_{експ}$  – кількість вимірів за 10 с;  $g(t_i)$  –  $i$ -те значення вихідного сигналу ДЄГ.

Абсолютна похибка експериментальних вимірювань  $\Delta_{g_{експ}}$ :

$$\Delta_{g_{експ}} = \frac{\sigma_{g_{експ}}}{\sqrt{N_{експ}}} t_p;$$

$$\sigma_{g_{експ}} = \sqrt{\frac{1}{N_{експ}} \sum_{i=0}^{N_{експ}} [\overline{g(t_i)} - \overline{g_{експ}}]^2};$$

$$t_p = qt(p, d), \quad (2.4)$$

де  $\sigma_{g_{експ}}$  – середньоквадратичне відхилення  $\overline{g_{експ}}(t)$ ;  $t_p = qt(p, d)$  – коефіцієнт оберненого розподілу Стюдента за довірчою імовірністю  $p$  та числом ступенів вільності  $d = N_{експ}$ .

Таблица 2.5

Похибки ДЄА, зумовлені вібраціями основи

$\omega$ , рад/с	$\overline{g_{експ}}(t)$ , м/с*с	$\Delta_{g_{експ}}$ , м/с*с	$\Delta_g$ , м/с*с
0	981100.3761	0.001136	0.00006001
0.5	981103.2946	0.006184	2.91861022
1.0	981103.4298	0.048067	3.05381611
5.0	981105.7721	0.581020	5.39611120
10.0	981108.9362	0.851001	8.89863610
30.0	981113.4471	2.764100	13.0710563

З табл. 2.5 встановлено, що:

– при нульових установках вібростенду вихідний сигнал ДЄА співпадає з довідниковим значенням ПСТ  $\Delta_g = 0.00006 \text{ м/с}^2$ ;

– для поступальних вібрацій вібростенду до 10 рад/с ДЄА забезпечує точність вимірювань  $\Delta_{g_{\text{експ}}} 1 \text{ м/с}^2$ .

Згідно з [1, 4] та результатами моделювання, резонансний режим може виникати на частотах:  $\omega_0 = 0,033; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3 \text{ рад/с}$ . Спектр збурюючих вібраційних поступальних прискорень на ЛА має максимум на частоті 1640 рад/с. Тому на нижчих резонансних частотах амплітуди вібраційних поступальних збурюючих прискорень менші. Методику обробки результатів не змінювали. Результати наведені у табл. 2.6. З табл. 2.6 робимо висновок, що навіть при найнесприятливіших резонансних режимах роботи ДЄГ забезпечує точність  $\Delta_{g_{\text{експ}}} = 0,5 \text{ м/с}^2$ .

Таблиця 2.6

Похибки ДЄА, зумовлені резонансними режимами роботи

$\omega, \text{ рад/с}$	$\overline{g_{\text{експ}}(t)}, \text{ м/с}^2$	$\Delta_{g_{\text{експ}}}, \text{ м/с}^2$	$\Delta_g, \text{ м/с}^2$
0	981100.3761	0.001136	0.000060
0,033	981100.5046	0.191160	0.128636
0,05	981100.5798	0.378130	0.203863
0,1	981101.1799	0.562309	0.483863
0,2	981101.5961	0.411891	0.320125
0,3	981102.4886	0.384961	0.212581

## 2.6. Результати досліджень МЕМС ДЄА

Встановлено, що результати експериментальних досліджень співпадають із результатами цифрового моделювання (рис. 41).



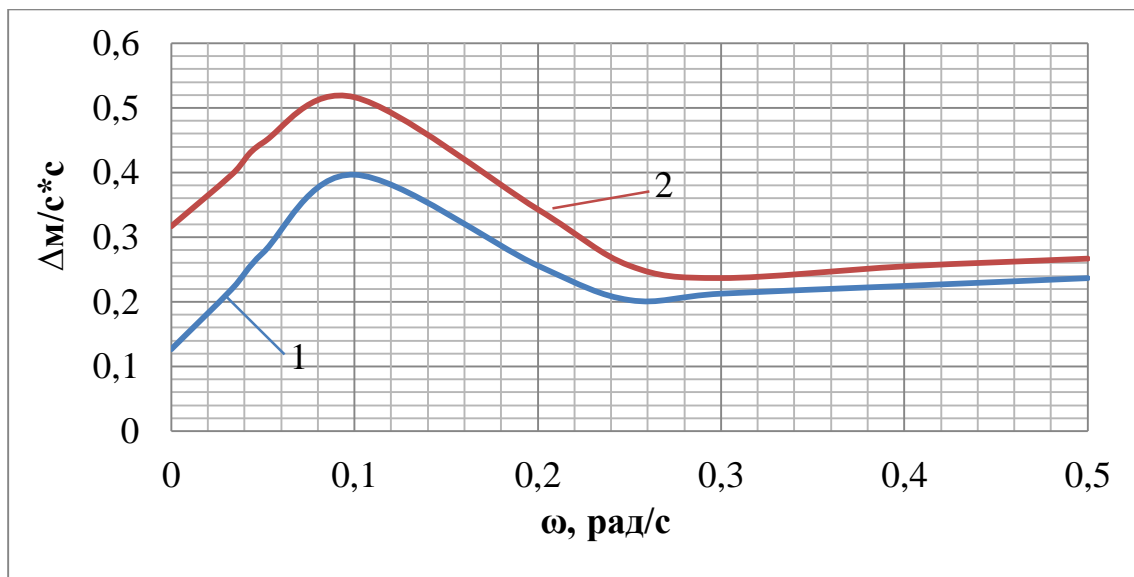


Рис. 41. Результати порівняння цифрового моделювання та експерименту:

1 – цифрове моделювання; 2—експеримент

## 2.7. Визначення метрологічних характеристик МЕМС ДЄА

За відсутності лінійних та кутових вібрацій, ДЄА може функціонувати як наземний гравіметр. Теоретична та експериментальна оцінка похибки ДЄА за відсутності збурень є  $0,00006 \text{ м/с}^2$ .

Отже, статична характеристика ДЄА:

$$\bar{g}_{ПГ} = \overline{g_{експ}} \mp 6 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2. \quad (2.5)$$

За наявності динамічних збурень, ДЄА функціонує як із точністю:

$$\bar{g}_{ПГАГС} = \overline{g_{експ}} \mp 0,5 \text{ м/с}^2. \quad (2.6)$$

Відносна похибка ДЄА:

$$\delta_g = \frac{\Delta_g}{g_{експ}} \cdot 100\% = \frac{1}{981100.37556} \cdot 100\% = 1,219 \cdot 10^{-4}\%. \quad (2.7)$$

ДЄА у складі АГС реєструє зміну аномалії  $\Delta g$  у реальному часі та обмежується лише можливостями сучасних ЕОМ. Тому його швидкодія достатньо висока.

Клас точності ДЄА АГС: у лабораторних умовах абсолютна похибка ДЄА склала  $\Delta_g = 0,00006 \text{ м/с}^2$ , а на ЛА абсолютна похибка становить  $0,5 \text{ м/с}^2$ , що відповідає найвищому класу точності.

### Другий метод дослідження ємнісного ЧЕ

Дослідження характеристик ємнісного акселерометра проводиться на установці, що складається з наступних приладів (рис. 42): генератора механічних коливань 1 (вібростенда) ГМК-1 зі вбудованими в нього двома індукційними перетворювачами електричного сигналу в механічний сигнал прискорення, підсилювача 3 змінного струму з регульованим входним опором та ємністю, трьох вольтметрів 4, осцилографа 5, генератора змінної напруги 6. Ємнісний акселерометр 2 розташований на вібростенді 1.

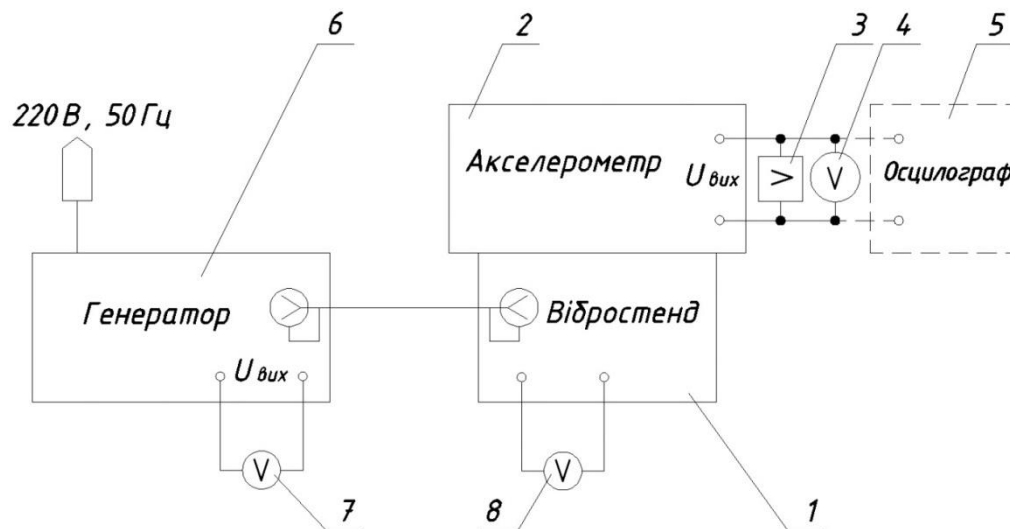


Рис. 42 - Принципова схема дослідної установки експериментальних досліджень ємнісного акселерометра:

1 - генератор механічних коливань (вібростенд) ГМК-1 зі вбудованими в нього індукційними перетворювачами, 2 — ємнісний акселерометр,  
3 - підсилювач, 4 - вольтметр, 5 - осцилограф, 6 - генератор змінної напруги живлення, 7 - вольтметр для реєстрації напруги генератора, 8 - вольтметр для реєстрації напруги індукційного перетворювача

Основою частиною експериментальної установки (рис. 42) є вібростенд ГМК-1 або генератор механічних коливань, конструктивно виконаний у вигляді двох магнітопроводів 8, 10. Магнітопроводи 8, 10 жорстко скріплені і утворюють єдину конструкцію соленоїдного типу. Стрижень 7 має можливість рухатись в середині соленоїда, створеного двома магнітопроводами 8, 10.

Рушійну силу для переміщень стрижня 7 створюють індукційні перетворювачі ІП, ІП2, обмотки 1, 2 та 3, 4 якого жорстко посажені на магнітопроводах 8 та 10.

Роботу індукційного перетворювача детально описано в [11].

Обмотки 1, 3 виконують функції генераторної(збудження), а обмотки 2, 4 - управління (або вихідної). Індукційні перетворювачі ІП1 і ІП2 призначені для перетворення вхідного електричного сигналу збудження у вихідний механічний сигнал руху стрижня 7, пропорційного прискоренню.

Стрижень 7 з обмотками 1, 2 та 3, 4 утримується гнучкими опорами у вигляді мембран 6, 9 спеціального типу, які поєднують достатню жорсткість з великим значенням лінійної ланки силової характеристики.

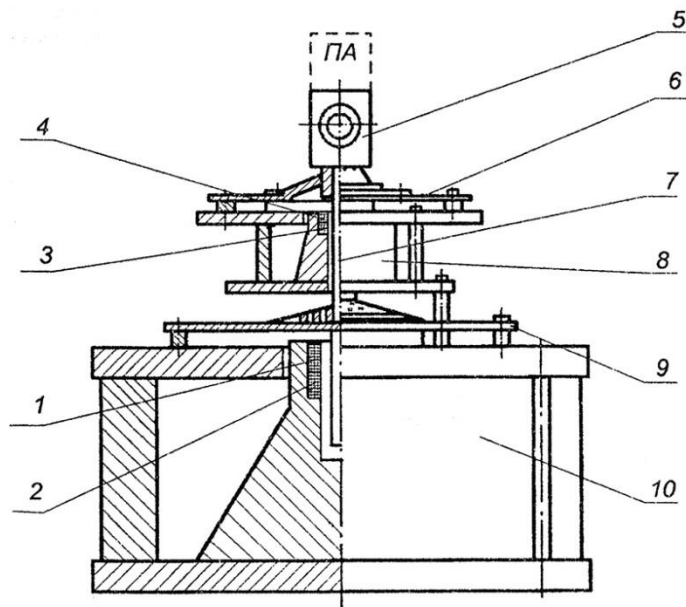


Рис. 43 - Генератор механічних коливань:

1,3- генераторні обмотки ІП1, ІП2; 2,4 - обмотки управління ІП1, ІП2;

5 - робочий столик вібростенда; 6, 9 - гнучкі мембрани; 7 — стрижень;

8, 10 – магнітопроводи

Закріплення стрижня з двох сторін мембранами 6, 9 дозволяє звести до мінімуму рух по напрямкам, не співпадаючим з повздовжньою віссю стрижня. Це забезпечить стрижню тільки один ступінь свободи в потрібному напрямку вертикальної вісі.

Магнітопроводи 8 і 10 забезпечують рівномірність магнітного поля. На верхньому кінці стрижня знаходиться робочий столик 5, на якому розміщено ємнісний акселерометр (ЄА), що досліджується.

Досліджуємий ЄА закріплений на робочому столику 5 генератора коливань (вібростенда). Діапазон можливих коливань вібростенда ГМК-1  $20 \div 20 \cdot 10^3$  Гц.

Вібростенд ГМК-1 за допомогою ІП1, ІП2 створює коливальні прискорення стрижня 7 та робочого столика 5, діючі на досліджуваний ЄА.

Амплітуда вібраційних коливань ЄА пропорційна напрузі  $U_{\text{ЄА}}$ , що знімається при лабораторних дослідженнях з вольтметра 4 та реєструється осцилографом 5 (рис. 42).

У лабораторних дослідженнях вольтметром 7 реєструється вихідна напруга генератора, що подається на обмотки збудження індукційних перетворювачів ІП1, ІП2  $U_{\text{ВП}}$  (рис. 42).

### Методика дослідження

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями та відповідними методичними вказівками.
2. Ознайомитись з принциповою схемою експериментальної установки (рис. 42), конструкцією вібростенда (рис. 43) та технічними даними приладів та засобів, що входять в установку. А саме: шкалами, органами управління, діапазонами роботи та ін.
3. Ознайомитись з конструкцією та технічними даними ємнісного акселерометра.
4. Затвердити вихідні дані експериментальних досліджень у викладача.
5. Перевірити з'єднання приладів в схемі експериментальної установки і отримати схвалення викладача щодо вірності з'єднань.
6. Встановити таке положення органів управління:
  - діапазони вольтметрів - 10 В;
  - ручки регулювання рівня генератора 6 “Уровень” - в крайнє (проти часової стрілки) положення.

7. Провести дослідження залежності амплітуди вихідної напруги, що знімається з ЄА  $U_{\text{ЄА}}$ , та напруги індукційного перетворювача  $U_{\text{ВП}}$ , від частоти  $f$  коливань вібростенда для амплітуди напруги з генератора  $U_{\text{ген}}=5$  В.

8. Провести дослідження залежності амплітуди вихідної напруги, знімаємої з ємнісного акселерометра  $U_{\text{ЄА}}$ , та напруги індукційного перетворювача  $U_{\text{ВП}}$  від частоти  $f$  коливань вібростенда для амплітуди напруги з генератора  $U_{\text{ген}}=7$  В.

9. Провести дослідження залежності амплітуди вихідної напруги, що знімається з п'єзоелектричного акселерометра  $U_{\text{ЄА}}$ , та напруги з індукційного перетворювача  $U_{\text{ВП}}$ , від частоти її коливань вібростенда для амплітуди напруги з генератора  $U_{\text{ген}}=8$  В.

10.Провести дослідження залежності амплітуди напруги з індукційного перетворювача  $U_{\text{ВП}}$  від амплітудного значення напруги з генератора  $U_{\text{ген}}$  для одних і тих самих значень частоти  $f$  коливань вібростенда.

11.Провести дослідження залежності амплітуд вихідної напруги з п'єзоелектричного акселерометра,які контролюємо вольтметром 4, (назвемо її резонансною  $U_{\text{САРЕЗ}}$ ) від частот резонансів вимірювальної системи  $f_{\text{рез}}$ , Гц, які задаємо генератором, для  $U_{\text{ген}}=5$  В;  $U_{\text{ген}}=7$  В;  $U_{\text{ген}}=8$  В.

## Висновки до другого розділу

Розроблено лабораторну установку та сформульовано основні положення методики проведення експериментальних досліджень ДЄА.

Зроблено конструктивний та аналітичний опис всіх основних складових експериментальної установки.

Побудовано градувальну характеристику ДЄА АГС та встановлено, що кут повороту вимірювальної осі ДЄА АГС відносно довідкової вертикалі впливає прямо пропорційно на його вихідні покази та величину його похибки.

Експериментально визначено похибку ДЄА у лабораторних умовах, яка становить  $0,00006 \text{ м/с}^2$ , що співпадає із результатами цифрового моделювання (розділ 4).

Експериментально встановлено, що у найнесприятливіших резонансних умовах,  $\omega = \omega_0 = 0,1 \text{ рад/с}$ ,  $\omega = 2\omega_0$ ,  $\omega = 3\omega_0$ ,  $\omega = \omega_0/2$ ,  $\omega = \omega_0/3$  ДЄА забезпечує точність вимірювань  $0,5 \text{ м/с}^2$ .

Встановлено, що систематична похибка ДЄА максимальна при  $\omega = \omega_0 = 0,1 \text{ рад/с}$  і не впливає на точність вимірювань.

### 3. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

#### «Стабілізатор квадрокоптера на основі ємнісного MEMS чутливого елемента»

Стартап на сьогоднішній день набув широкого розповсюдження завдяки зниженню порогу входу на ринок. Стартапом називають підприємство або компанію, яка має інноваційну ідею, але не має достатньої кількості ресурсів для реалізації даної ідеї. Головною метою розробки стартап-проекту є сформулювати свою ідею, підібрати команду однодумців для її реалізації та залучення інвесторів для проведення фінансування.

Створення та виведення стартап-проекту передбачає виконання наступних етапів, а саме визначення ринкової перспективи задумки, графік та принципи організації виробництва, фінансовий аналіз та аналіз ризиків і дії з просування пропозиції для інвесторів.

#### 3.1 Опис ідеї проекту

Розглянувши в попередніх розділах конструкцію та принцип дії ємнісного MEMS чутливого елемента, було розроблено прилад для стабілізації квадрокоптера.

У таблиці 3.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 3.1. Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Пропонується новий прилад для стабілізації камери відеозапису на основі п'єзоелементу. Зміст ідеї	1. Використання для зйомок кадрів з квадрокоптера на великій висоті для відображення масштабності об'єктів	Прилад разом з високоякісною камерою дає можливість отримати чіткий та якісний відеозапис за будь яких умов (тряски, вібрацій, нахилів камери).



	2. Використання для стабілізації озброєння військової техніки	За допомогою цього приладу приціл військової техніки здатен стабілізуватися при великій швидкості та при будь-якій нерівності рельєфу..
	3. Використання для стабілізації підвіски автомобіля	Прилад дозволяє стабілізувати нахили автомобіля під час руху, що нівелює дискомфорт для пасажирів.

Отже, пропонується новий прилад, що має багато напрямків застосування, та має вигоди для застосування користувачами. Основна відмінність даного апарату полягає в тому що він заснований на ємнісному чутливому елементі, що дає змогу використовувати пристрій на різному діапазоні частотах коливання, та забезпечує рівномірну стабілізацію за будь яких умов.

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

- визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;
- проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 3.2).

Таблиця 3.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні властивості	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W	N	S
		Мій прилад	Конкурент 1 – Квадрокоптер DJI Mavic Mini	Конкурент 2 – Квадрокоптер Hubsan Zino Pro			
1	Кількість вісей стабілізатора	3	3	3	+	+	+

2	Вісь нахилу	Від -90 до +110°	від -90° до +70°	від 185 ° до -95 °	-	-	+
3	Вага	250	249	700	+	-	-
4	Ергономічність	Зручний у користуванні	Зручний у користуванні	Зручний у користуванні	+	+	-
5	Кутовий діапазон вібрацій	±0,02°	±0.03°	±0,02°	+	-	+
6	Мобільність	Мобільний	Мобільний	Мобільний	+	+	+
7	Ціна	10000грн	12500грн	18000 грн	+	-	-

Виходячи з наведеного переліку слабких, сильних та нейтральних характеристик і властивостей ідеї потенційного товару можна дійти до висновку про конкурентоспроможність запропонованого методу. Апарат розроблений мною має багато переваг перед своїми аналогами. Цей апарат має найнижчу ціну, найнижчу вагу, та має кутовий діапазон вібрації на рівні з більш високовартісними аналогами. Можна зробити висновок, що прилад більш економічно вигідний, тому що маючи кращі характеристики має нижчу ціну.

Таблиця 3.2.1 – Морфологічна карта

Основні параметри	Проміжні рішення				
	1-ше	2-ге	3-тє	4-тє	5-тє
Ємність акумулятора, мА	1600	2200	2400		
Мікроконтролер	Arduino Uno	Raspberry Pi	Arduino Mega	Arduino Nano	Arduino Mini
Швидкість стабілізації при нахилі	90 ° / с	180 ° / с	360 ° / с		
Швидкість стабілізації при обертанні	90 ° / с	180 ° / с	360 ° / с		

### 3.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводимо аудит технології за допомогою якої можна реалізувати ідею створення проекту.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Дослідження якісних характеристик ємнісного чутливого елемента	Лабораторна установка (Вібростенд)	Лабораторна установка розроблена	Доступна
2	Аналіз стабілізації отриманого відео ємнісним стабілізатором	Лабораторна установка	Лабораторна установка, розроблена	Відносно доступна
3	Перевірка ефективності результатів дослідів	Методи статистики	Розроблена	Доступна
4	Розробка приладу, на основі проведених досліджень	Механічна обробка, електричний монтаж елементів	Технологія розроблена	Відносно доступна

Проаналізувавши таблицю можна зробити висновок що можливість технологічної реалізації даного проекту висока. Оскільки, технології, що використовуються при розробці продукту відносно доступні та включають поєднання існуючих доступних приладів та засобів математичної статистики, але треба більш детально дослідити рівень стабілізації ємнісним чутливим елементом.

### 3.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

Визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 3.4).

Таблиця 3.1. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3 «Mavic.» (Китай), «Hubsan» (Китай), «iFly» (Китай),
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	18 000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Сертифікат якості
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Технічна сертифікація. Додаткові випробування (на вібростендах). Вимоги щодо точності відповідно до паспорту приладу.
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	31%

Проаналізувавши дані наведеної таблиці можна зробити висновок, що розробкою та реалізацією стабілізаторів для квадрокоптерів переважно займаються китайські компанії, а вітчизняний ринок поки що не розвивається в цьому напрямку. Проте попит на такі пристрої в Україні високий. Це дозволяє розраховувати на вихід на український ринок при наявності сертифікату у відповідності технічного регламенту.

Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 3.5).

Таблиця 3.2. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Розробка нових ефективніших матеріалів для стабілізації	Інженери, матеріалознавці, автоконцерни, наукові інститути.	Якість продукту; Наявність необхідної дозвільної документації (відповідність стандартам, сертифікати відповідності (якості), тощо);	Високий показник «ціна/якість». Гарантійні зобов'язання. Точність приладу.
Розробка нового	Кінематографісти, оператори, режисери,	Ефективність пристрою для стабілізації	Зручна у використанні.

принципу стабілізації	для особистого використання	квадрокоптера. Кут нахилу. Кут обертання	
-----------------------	-----------------------------	---	--

Після визначення потенційних груп клієнтів проводимо аналіз ринкового середовища: складаємо таблиці факторів що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. № 3.6-3.7) Фактори в таблиці подано в порядку зменшення значущості

Таблиця 3.3. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Нові фірми конкуренти	Збільшення конкурентоздатної продукції на ринку	Вдосконалення товару; маркетингова діяльність.
2	Нові технології	Застарілість товару	Кардинальні зміни у технології виготовленні, що призведуть до модернізації
3	Технічне обслуговування	Наявність не уніфікованих елементів	Використання уніфікованих елементів

Але поряд із колом загроз існують і певні можливості (таблиця 3.7).

Таблиця 3.4. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Високий попит на продукцію	Доцільно збільшити виробництво товару та товарообіг	Збільшення одиниць товару, впровадження модифікацій товару.
2	Потреба в доступній методиці	Актуальна розробка з низькою собівартістю	Залучення іноземних інвестицій.
3	Зростання рівня доходів населення	Збільшення кількості продажів, підвищення ціни	Збільшення одиниць товару, підвищення ціни.
4	Впровадження нових технологій	Якісне покращення основних параметрів продукту	Підвищення попиту та ціни

Після проведеного аналізу факторів можливостей та загроз можна сказати, що ринок приладів стабілізації зображення є перспективним та цікавим для виходу на ринок нових компаній.

Надалі проводимо аналіз пропозиції: визначаємо загальні риси конкуренції на ринку (табл. 3.8).

Таблиця 3.5. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Чиста конкуренція	Окремі покупці і продавці не можуть впливати на ціну.	Концентрація діяльності підприємства на якість товару.
2. Національна конкуренція	Між компаніями всередині країни.	Варіація об'ємів виробництва, співпраця з відеографами та науковими дослідниками.
3. Внутрішньогалузева конкуренція	Конкурентна боротьба між підприємствами в межах однієї галузі.	Формування адекватної ринкової вартості товару.
4. Товарно-видова конкуренція	Конкуренція між товарами одного виду.	Створення модифікацій з покращеним функціоналом.
5. Нецінова конкуренція	Вдосконалення якості продукції та умов її продажу.	Зміни у виробництві: додаткові витрати, підвищення рівня довіри клієнтів.
6. Марочна конкуренція	Конкурентні компанії пропонують подібний продукт.	Зниження цін на товар; концентрація діяльності на якісній зміні продукту. Створення власної торгової марки.

За результатами аналізу таблиці 3.8 можна зробити висновок, що запропонована конструкція демонструє високу конкурентоспроможність. Найбільш небезпечними бачиться товарно-видова. Оскільки товари аналоги виготовляють з урахуванням довгого перебування на ринку мають досить високий рівень довіри клієнтів.

Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі.

Таблиця 3.6. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	«Mavic» (Китай)	Міжнародний виробник квадрокоптерів.	Змінні витрати постачальників. Концентрація постачальників	Розмір закупівель. Змінні витрати. Рівень чутливості до змін цін.	Змінні витрати. Лояльність споживачів. Сумісність
Висновки:	Висока інтенсивність	Є можливості входу в ринок. Є потенційні конкуренти. Строк виходу на ринок орієнтовно 11 місяців	Постачальники диктують умови роботи ринку.	Клієнти диктують умови роботи на ринку	Обмежень для роботи на ринку через товари-замінники немає

З огляду на конкурентну ситуацію (враховуючи високу інтенсивність конкуренції) можна зробити висновок щодо можливості роботи на ринку. Даний апарат має бути простим в експлуатації, зручним у використанні та забезпечувати максимальну якість стабілізації.

Після всіх аналізів визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в табл. 3.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 3.2), вимог споживачів до товару (табл. 3.5) та факторів маркетингового середовища (табл. № 3.6-3.7) визначаємо та обґрунтовуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлений за табл. 3.10.

Таблиця 3.7. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
-------	-------------------------------	---

1	Ціна	Ціна на товар являється одним із засобів ведення конкурентної боротьби, оскільки дана розробка є дешевшою ніж закордонні аналоги.
2	Доступність клієнтам	Дає можливість використовувати цей прилад самостійно без додаткової підготовки.
3	Мобільність	Зручний у використанні та компактний для транспортування.
4	Простота реалізації	Забезпечується використанням існуючими квадрокоптерами.
5.	Технічне обслуговування	Величина значення напрацювання на відмову вище середньої для даного класу обладнання.

Згідно таблиці 3.10 можна дійти висновку, що дана конструкція має ряд важливих факторів, які гарантуватимуть її конкурентоспроможність. Найважливіші з них полягають у особливості конструкції, яка забезпечить легкий та комфортний процес стабілізації квадрокоптера і камери на ньому, а також в доступності апарату в порівнянні із закордонними аналогами.

Таблиця 3.8. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Прилад для стабілізації квадрокоптера та камери на основі ємнісного чутливого елемента»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з Mavic						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Ціна	16						+	
2	Доступність клієнтам	11					+		
3	Висока якість	16				-			
4	Технічна підтримка	11					+		
5.	Простота реалізації	14		+					

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 3.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей.



Таблиця 3.9. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: час стабілізації квадрокоптеру та камери, швидкість кутового обертання, ефективність методу.	Слабкі сторони: залежність від поставок, початківцець на ринку
Можливості: надовго закріпитись на ринку товарів; конкурентоспроможність; інвестування іноземних компаній; модифікація існуючих апаратів та створення нових; збільшення обсягів продажів.	Загрози: збільшення конкуренції на ринку апаратури стабілізації квадрокоптера; розвиток новітніх технологій; зниження доходів потенційних споживачів; політичні та економічні ризики ведення бізнесу; .

На основі SWOT-аналізу розробляємо альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок (див. Табл. 3.9, аналіз потенційних конкурентів).

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 3.13).

Таблиця 3.10. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Залучення споживачів — рекламувати товар і зацікавлювати кінцевих споживачів з метою збільшення попиту на товар.	Ймовірність висока, оскільки в разі успіху це збільшить попит на продукт серед споживачів і, відповідно, серед посередників.	1 рік
2	Стратегія компенсації слабких сторін старт-апу наявними ринковими можливостями	Ймовірність висока, тому що продукт стане більш конкурентно спроможним	11 місяців

3	Встановлення низької початкової ціни на товар з метою заохочення більшої кількості покупців та завоювання більшої частки ринку.	Ймовірність висока, тому що продукт має багато переваг і в поєднанні з низькою ціною він повинен створити великий попит серед покупців.	7 місяців
---	---	---	-----------

Базуючись на таблиці 3.13 можна зробити висновок: найбільш перспективна – це встановлення низької ціни на товар з метою заохочення більшої кількості покупців. Низька ціна – найпростіший спосіб досягнути великих продажів для нового продукту на ринку. Дана альтернатива має найкоротші терміни реалізації

### 3.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 3.11. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Приватні студії для запису наукових і художніх відео-робіт	Так	60%	Середня	Наявні обмеження
2	Приватні телекомпанії	Так	40%	Середня	Наявні обмеження
3	Пересічні люди	Так	30%	Висока	Наявні обмеження

За результатами аналізу попит є ймовірним від приватних студій для запису наукових і художніх відео-робіт, приватних телекомпаній та пересічних людей. Для пересічних людей основними критеріями будуть ціна та комфорт. Тоді як для приватних студій для запису наукових і художніх відео-робіт більш важливими буде якість та функціональність пристрою.

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку.

Таблиця 3.12. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Проект приладу для стабілізації квадрокоптеру та камери на ньому	Через виставки, конференції, публічні презентації на технічних форумах	Ціна, простота використання, та ефективність приладу	Лідерства по витратах

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 3.16).

Таблиця 3.13. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопроходцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні	Так	Так, принцип роботи	Стратегія наступальна

На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальника і продукту, а також в залежності від стратегії розвитку (табл. 3.15) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 3.16) розробляємо стратегію позиціонування (табл. 3.17) яка визначається у формування ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект.

Таблиця 3.14. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
-------	-------------------------------------	---------------------------	--	--

	Якість, простота використання приладу	Розробка більш простого пристрою	Новий простий спосіб стабілізування квадрокоптера і його камери.	За показниками якості; За сферою застосування; За різновидом товару.
--	---------------------------------------	----------------------------------	--	--

Результатом даного підрозділу є система рішень щодо ринкової поведінки компанії, вона визначає в якому напрямі буде працювати компанія на ринку.

### 3.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 3.18 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 3.15. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Розширення способів стабілізації квадрокоптера та його камери	Дешевизна, ефективність.	Застосування ємнісного чутливого елемента, як основу пристрою

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнюється ідея продукту, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 3.19).

Таблиця 3.16. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Ст створення приладу для стабілізування квадрокоптеру та камери на ньому, за допомогою якого проводиться стабілізування зображення з квадрокоптера шляхом визначення ємнісним чутливим елементом положення у просторі, та подальшим стабілізуванням по трьом координатам.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	Вартість обслуговування	М	Е
	Строк безвідмовної праці	Нм	Тх
	Трудомісткість виготовлення	Нм	Тх
	Зручність управління	Нм	Тх
	Мобільність	Нм	Тх
	Пакування: розробляється відповідно до дійсних стандартів, а також проводиться перевірка на якість за допомогою гостей.		
	Марка: НТУУ «КПІ ім.. І.Сікорського»		
	До продажу можливість аналізу та усунення неполадок.		

III. Товар із підкріпленням	Після продажу можливість розробки покращень та модернізації існуючий приладів
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патентування принципу та конструкції пристрою.	

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 3.20).

Таблиця 3.17. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	Квадрокоптер з камерою «DJI Mavic Mini.»	12500 грн	14000-22000грн	12000 грн
2	Квадрокоптер з камерою «Hubsan Zino Pro»	18000 грн		20000 грн

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту (табл. 3.21).

Таблиця 3.18. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Орієнтація на регулярні поставки	Встановлення контактів із споживачами та підтримка їх Формування попиту і стимулювання збуту Дослідницька робота зі збору маркетингової інформації Зменшення витрат в ході збуту продукції	Продаж головним виробникам відео-контенту України .	Через внутрішній ринок

Останньою складової маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 3.22).

Таблиця 3.19. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Клієнти пов'язані з виробництвом відеоматеріалів	Виставки, конференції.	Доступність кінцевим користувачам; Комплексний підхід; Зручність використання; Мобільність	Заохочувати покупців купувати даний продукт, демонструючи переваги та якість стабілізування	Виставки, конференції, рекламні плакати

Результатом пункту 5 є ринкова (маркетингова) програма, що включає в себе концепції товару, збуту, просування та попередній аналіз можливостей ціноутворення, спирається на цінності та потреби потенційних клієнтів, конкурентні переваги ідеї, стан та динаміку ринкового середовища, в межах якого буде впроваджено проект, та відповідну обрану альтернативу ринкової поведінки.

### **Висновки до розділу 3**

Провівши аналіз можна зробити висновок про високу можливість ринкової комерціалізації даного проекту у зв'язку з наявністю попиту споживачів у виробників відео-контенту на продукцію в цьому сегменті ринку та позитивною динамікою ринку стабілізаторів квадрокоптерів та камери на ньому. Обмеження для входу являються дозвільні документи та потужності виробництва.

З огляду на конкурентну ситуацію (враховуючи високу інтенсивність конкуренції) можна зробити висновок щодо можливості роботи на ринку. Даний апарат повинен бути простим в експлуатації, зручним у використанні та забезпечувати високу якість.

Конструкція запропонованого приладу має ряд важливих факторів, які гарантуватимуть конкурентоспроможність даного проекту. Найважливіші з них полягають у особливості конструкції, яка забезпечує ефективну стабілізацію квадрокоптера та камери на ньому за такої ж ціни в порівнянні з аналогами на ринку.

За результатами аналізу потенційних груп споживачів попит є ймовірним від приватних студій для запису наукових і художніх відео-робіт. Для даної групи основними критеріями будуть якість та функціональність.

Для даного проекту обрано альтернативний варіант впровадження - встановлення низької ціни на новий продукт з метою залучення більшої кількості покупців і завоювання своєї частки на ринку.

Враховуючи високий попит споживачів, позитивну динаміку ринку стабілізаторів квадрокоптерів та камер на ньому, високу інтенсивність конкуренції та якісні відмінності даного продукту від продуктів конкурентів, вважаю доцільним подальше впровадження проекту

### **Висновки до розділу 3**

Провівши аналіз можна зробити висновок про високу можливість ринкової комерціалізації даного проекту у зв'язку з наявністю попиту споживачів у виробників відео-контенту на продукцію в цьому сегменті ринку та позитивною динамікою ринку стабілізаторів квадрокоптерів та камери на ньому. Обмеження для входу являються дозвільні документи та потужності виробництва.

З огляду на конкурентну ситуацію (враховуючи високу інтенсивність конкуренції) можна зробити висновок щодо можливості роботи на ринку. Даний апарат повинен бути простим в експлуатації, зручним у використанні та забезпечувати високу якість.

Конструкція запропонованого приладу має ряд важливих факторів, які гарантуватимуть конкурентоспроможність даного проекту. Найважливіші з них полягають у особливості конструкції, яка забезпечує ефективну стабілізацію квадрокоптера та камери на ньому за такої ж ціни в порівнянні з аналогами на ринку.

За результатами аналізу потенційних груп споживачів попит є ймовірним від приватних студій для запису наукових і художніх відео-робіт. Для даної групи основними критеріями будуть якість та функціональність.

Для даного проекту обрано альтернативний варіант впровадження - встановлення низької ціни на новий продукт з метою залучення більшої кількості покупців і завоювання своєї частки на ринку.

Враховуючи високий попит споживачів, позитивну динаміку ринку стабілізаторів квадрокоптерів та камер на ньому, високу інтенсивність конкуренції та якісні відмінності даного продукту від продуктів конкурентів, вважаю доцільним подальше впровадження проекту



## **Загальні висновки**

Зроблено аналітичний огляд конструкцій найбільш поширених ЧЕ. Показано, що одним із найбільш перспективних є ємнісний ЧЕ, який досліджено у даній роботі. Було обрано ємнісний ЧЕ, як такий, що має суттєві переваги, а саме: високу лінійність, малу температурну чутливість, простоту і дешевизну у виготовленні та високу точність показань.

Розглянуто принцип дії, описано конструкцію ємнісного ЧЕ. Розглянуто найбільш поширені схеми включення ЧЕ. Розраховано основні фізичні та механічні параметри. Розроблено математичну модель ємнісного ЧЕ. Описано конструкцію та принцип лабораторної установки для експериментального дослідження ємнісного МЕМС акселерометра та був зроблений опис дослідження ємнісного ЧЕ на вібростенді. Проведено дослідження ємнісного елемента на вібростолі.

У стартап-розділі був зроблений огляд ринку та перспективність використання ємнісного чутливого елемента для стабілізації.

## Список літератури

- 1) Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н.Н. Датчики контроля и регулирования: Справочные материалы. – М.: Машиностроение, 1965. – 928 с.
- 2) Аврутов В.В., Бондар П.М., Мелешко В.В. Міроаселерометри та їх випробування. Навчальний посібник. – К.: Корнійчук, 2008. – 62 с.
- 3) Безвесільна О. М., Таланчук П. М. Перетворювальні пристрої приладів. – К.: ІСДО, 1994. – 448с.
- 4) Безвесільна О. М., Вимірювання гравітаційних прискорень: Підручник для студентів приладобудівних спеціальностей вищих навчальних закладів. – Житомир: ЖІТІ, 2002. – 264с.
- 5) Бухгольц В. П., Тысевич Э. Г. Емкостные преобразователи в системах автоматического контроля и управления. -М.: Энергия, 1972. - 79 с.
- 6) Браславский Д. А., Логунов С. С., Пельпор Д. С. Авиационные приборы и автоматы. – М.: Машиностроение, 1978. – 432 с.
- 7) Никитин Е.А., Балашова А. А. Проектирование дифференцирующих и интегрирующих гироскопов и акселерометров. –М.: Машиностроение, 1969. – 215 с.
- 8) Павловский М. А. Теория гироскопов. – К.: Высшая школа, 1986. – 304 с.
- 9) Пельпор Д. С., Михалев И. А., Бауман В. А., Матвеев В. А., Ягодкин В. В., Коновалов С. Ф. «Гироскопические системы. Гироскопические приборы и системы». — М.: Высшая школа, 1988. – 128 с.
- 10) Безвесільна О.М. Вимірювання гравітаційних прискорень / О. М. Безвесільна. – Житомир : ЖІТІ, 2002. – 264 с.



# ДОДАТКИ